



โครงการทางวิศวกรรม

เรื่อง

การหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการอบแห้งเนื้อปลับขึ้นอบกึ่งแห้ง
(พลับหมาด) โดยใช้วิธีพื้นผิวตอบสนอง

กรณีศึกษา : ศูนย์พัฒนาโครงการหลวงแม่ปุนหลวง จังหวัดเชียงใหม่

Optimization of semi dehydration of persimmon peeled using response
surface methodology (*Diospyros kaki* L.)

Case study: Mae Pun Luang Center of Development Royal Project,
Chiang Mai Province

นาย	กฤษดาภรณ์	พุทธรวงศ์	รหัสนักศึกษา	6515125004
นาย	ก้องภพ	จันทร์อ้าย	รหัสนักศึกษา	6515125005
นางสาว	นิราวรรณ	ศรีรงค์	รหัสนักศึกษา	6515125034
นางสาว	วัชรพร	เสชู	รหัสนักศึกษา	6515125051

หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมฟาร์มอัจฉริยะและนวัตกรรมเกษตร (ต่อเนื่อง)

วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้

ปีการศึกษา 2566



โครงการทางวิศวกรรม

เรื่อง

การหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการอบแห้งเนื้อพลับขึ้นอบกึ่งแห้ง
(พลับหมาด) โดยใช้วิธีพื้นผิวตอบสนอง

กรณีศึกษา : ศูนย์พัฒนาโครงการหลวงแม่ปุนหลวง จังหวัดเชียงใหม่

Optimization of semi dehydration of persimmon peeled using response
surface methodology (*Diospyros kaki* L.)

Case study: Mae Pun Luang Center of Development Royal Project,
Chiang Mai Province

นาย	กฤษดาภรณ์	พุทธรังค์	รหัสนักศึกษา	6515125004
นาย	ก้องภพ	จันทร์อ้าย	รหัสนักศึกษา	6515125005
นางสาว	นิราวรรณ	ศรีรงค์	รหัสนักศึกษา	6515125034
นางสาว	วัชรพร	เสชู	รหัสนักศึกษา	6515125051

หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมฟาร์มอัจฉริยะและนวัตกรรมเกษตร (ต่อเนื่อง)

วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้

ปีการศึกษา 2566



การหาสถานะที่เหมาะสมสำหรับการอบแห้งเนื้อพลับขึ้นอบกึ่งแห้ง
(พลับหามาต) โดยใช้วิธีพื้นผิวตอบสนอง

กรณีศึกษา : ศูนย์พัฒนาโครงการหลวงแม่ปุนหลวง จังหวัดเชียงใหม่

Optimization of semi dehydration of persimmon peeled using response
surface methodology (*Diospyros kaki* L.)

Case study: Mae Pun Luang Center of Development Royal Project, Chiang Mai Province

นาย	กฤษดาภรณ์	พุทธรังค์	รหัสนักศึกษา	6515125004
นาย	ก้องภพ	จันทร์อ้าย	รหัสนักศึกษา	6515125005
นางสาว	นิราวรรณ	ศรีรงค์	รหัสนักศึกษา	6515125034
นางสาว	วัชรพร	เสชู	รหัสนักศึกษา	6515125051

โครงการนี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาพลังงานทดแทน
วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้

คณะกรรมการสอบโครงการ

..... อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก

(รองศาสตราจารย์ ดร.ฤทธิชัย อัครราชันย์)

..... กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ เสมอขวัญ ตันติกุล)

..... กรรมการ

(อาจารย์ทัศนีย์ ชัยยา)

..... คณบดีวิทยาลัยพลังงานทดแทน

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นิกราน หอมดวง)

วัน 31 เดือนมกราคม พ.ศ 2567

@ ลิขสิทธิ์ของวิทยาลัยพลังงานทดแทน

มหาวิทยาลัยแม่โจ้

กิตติกรรมประกาศ

การดำเนินโครงการวิศวกรรม เรื่อง การหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการอบแห้งเนื้อพลับขึ้นอบกึ่งแห้ง (พลับหามา) โดยใช้วิธีพื้นผิวตอบสนอง (Optimization of semi dehydration of persimmon peeled using response surface methodology) และลุล่วงไปด้วยดีก็เพราะได้รับการช่วยเหลือจากผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ฤทธิชัย อัครราชันย์ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการที่ให้คำปรึกษา และแนะนำวิธีการเขียนข้อเสนอโครงการบรรลुวัตถุประสงค์ที่กำหนดไว้

คณะผู้จัดทำโครงการฯ ขอขอบคุณอาจารย์ทัศนีย์ ชัยยา และรองศาสตราจารย์เสมอขวัญ ตันติกุล คณะอาจารย์ผู้รับผิดชอบหลักสูตรวิศวกรรมฟาร์มอัจฉริยะและนวัตกรรมเกษตร ที่กรุณามาเป็นกรรมการข้อสอบโครงการในครั้งนี้

คณะผู้จัดทำโครงการฯ ขอขอบคุณ ศูนย์พัฒนาโครงการหลวงแม่ป่วนหลวง และสำนักงานพัฒนาการวิจัยการเกษตร (องค์การมหาชน) มอบทุนสนับสนุนโครงการวิศวกรรมจนสำเร็จ

คณะผู้จัดทำโครงการฯ ขอขอบคุณวิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาลัยแม่โจ้ ที่มอบทุนสนับสนุนเพื่อทำโครงการพลังงานทดแทน เทคโนโลยีและนวัตกรรมเกษตรสมัยใหม่ วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาลัยแม่โจ้ ภายใต้งบประมาณสนับสนุน “โครงการยกระดับวิสาหกิจชุมชนและผู้ประกอบการใหม่ด้วยเทคโนโลยีและนวัตกรรมเกษตรสมัยใหม่ (ภายใต้กิจกรรม) : พัฒนากำลังคนด้านเทคโนโลยีและนวัตกรรมอัจฉริยะ)” สำหรับนักศึกษาปริญญาตรีประจำปีงบประมาณ 2556 สุดท้ายนี้คณะผู้จัดทำโครงการฯ หวังเป็นอย่างยิ่งว่าโครงการเล่มนี้จะเป็นประโยชน์ต่อผู้ที่สนใจ หากผิดพลาดประการใดคณะผู้จัดทำโครงการฯ ขออภัยไว้ ณ ที่นี้

นายกฤษฎาภรณ์	พุทธรังค์
นายก้องภพ	จันทร์อ้าย
นางสาวนิราวรรณ	ศรีรงค์
นางสาววัชรภาพร	เสาชู

บทคัดย่อ

ชื่อโครงการ

การหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการอบแห้งเนื้อปลับขึ้นอบกึ่งแห้ง (ปลับหมาด)
โดยใช้วิธีตอบสนอง กรณีศึกษา : ศูนย์พัฒนาโครงการหลวงแม่ปุ่นหลวงจังหวัดเชียงใหม่

ผู้ทำโครงการ

1 นายกฤษดาภรณ์

พุทธรังค์

รหัสนักศึกษา

6515125004

2 นายก่อภพ

จันทร์อ้าย

รหัสนักศึกษา

6515125005

3 นางสาวนิรารรณ

ศรีรงค์

รหัสนักศึกษา

6515125034

4 นางสาววัชรพร

เส่ชู

รหัสนักศึกษา

6515125051

อาจารย์ที่ปรึกษา

รองศาสตราจารย์ ดร.ฤทธิชัย อัครวราชันย์

กรรมการ

1. รองศาสตราจารย์เสมอขวัญ ดันติกุล

2. อาจารย์ทัศนีย์ ชัยยา

การศึกษานี้เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมของการอบขึ้นปลับอบกึ่งแห้งด้วยเครื่องอบแห้งระบบภาดหมุน โดยเทคนิคพื้นผิวตอบสนอง (response surface methodology, RSM) วางแผนการทดลองแบบ Central Composite Design (CCD) เพื่อศึกษาผลของตัวแปรอิสระ 3 ปัจจัย คือ อุณหภูมิลมร้อน 3 ระดับ คือ 45, 55 และ 65 องศาเซลเซียส ค่าความเร็วลม 3 ระดับ คือ 0.32, 0.54 และ 0.81 เมตรต่อวินาที และความเข้มข้นของสารป้องกันการเกิดสีน้ำตาล 3 ระดับ คือ 500, 1,000 และ 1,500 พีพีเอ็ม ต่อค่าคุณภาพที่นำมาศึกษา ได้แก่ สมบัติทางทศนศาสตร์ในระบบสี CIE-L*a*b* สารประกอบฟีนอลิกรวม (Total phenolic content, TPC) และความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ วิธี Scavenging activity of DPPH radical และ ABTS radical ตามลำดับ ด้วยเทคนิควิเคราะห์แบบ Box-Behken Design (BBD) ผลการศึกษาพบว่า สภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการผลิตเนื้อปลับอบกึ่งแห้งเครื่องอบแห้งระบบภาดหมุน คือสภาวะที่เหมาะสมในการอบกึ่งแห้ง (ปลับหมาด) ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ความเร็วลม 0.54 เมตรต่อวินาที โดยใช้ในสารป้องกันการเกิดสีน้ำตาล KMS ที่ความเข้มข้นเท่ากับ 1,000 พีพีเอ็มสภาวะดังกล่าวมีอัตราการอบแห้ง 3.10±0.87 กรัม น้ำ /กรัม น้ำหนักแห้งต่อนาที และพลังงานจำเพาะในการอบแห้งเท่ากับ 0.41±0.011 กิโลจูล/ กิโลกรัม น้ำ โดยมีต่อสมบัติทางทศนศาสตร์ในระบบสี CIE-L*a*b* เท่ากับ 33.6±5.24, 10.1±2.42 และ 19.2±3.11 ตามลำดับ สอดคล้องกับสภาวะที่เหมาะสมในการแปรรูปต่อการรักษาคุณภาพทางเคมี พบว่าสภาวะดังกล่าวมีสารประกอบฟีนอลิก (TPC) และความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ (ABTS และ DPPH) สูงสุดมีค่าอยู่ระหว่าง 60.87±3.64 มิลลิกรัมแกลลิกต่อมิลลิกรัม และความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ (DPPH และ ABTS) เท่ากับ 63.20±4.52 และ, 65.99±5.01 ตามลำดับ ผลการดำเนินโครงการวิศวกรรมค้นพบสภาวะที่เหมาะสมในการปรับปรุงกระบวนการแปรรูป ผลิตภัณฑ์ปลับกึ่งแห้งที่สีสวย และมีสารต้านอนุมูลอิสระปริมาณมาก

คำสำคัญ:

เนื้อปลับอบกึ่งแห้ง, การอบแห้ง, สมบัติทางทศนศาสตร์, สารประกอบฟีนอลิกรวม, ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ

Abstract

Project Title Optimization of semi dehydration of persimmon peeled using response surface methodology (Diospyros kaki L.) Case study: Mae Pun Luang Center of Development Royal Project, Chiang Mai Province

Author

1. Mr. Kritsadaphon Phutthawong	Student ID 6515125004
2. Mr. Kongphob Chanai	Student ID 6515125005
3. Miss Nirawan Srirong	Student ID 6515125034
4. Miss Watcharaphon Sesusu	Student ID 6515125051

Adviser Associate Professor Dr.Rittichai Assawarachan

Committee

1. Associate Professor Samerkhwan Tantikul
2. Miss Tasanee Chaiya

The objective of this study was to enhance the semi-drying process of persimmons through the application of response surface methodology (RSM) and the Central Composite Design (CCD). Three critical independent variables temperature (45, 55, and 65°C), air flow (0.32, 0.54, and 0.81 m/s), and potassium metabisulfite (KMS) concentration (500, 1,000, and 1,500 ppm) were systematically investigated to evaluate their impact on the quality of semi-dried persimmons. The quality assessment encompassed various parameters, including optical properties within the CIE-L*a*b* color system, total phenolic content (TPC), and antioxidant capacity determined using the DPPH and ABTS assays. Utilizing the Box-Behnken Design (BBD) analysis, we identified the optimal conditions for semi-drying persimmons in a rotary tray dryer: a temperature of 60°C, an air flow rate of 0.54 m/s, and a KMS concentration of 1,000 ppm. Under these optimized conditions, the drying rate achieved 3.10 ± 0.87 g/g min, with a specific energy consumption for drying at 0.41 ± 0.011 kJ/kg_{water}. In terms of the CIE-Lab* color system, the resulting values were 33.6 ± 5.24 , 10.1 ± 2.42 , and 19.2 ± 3.11 , respectively. Furthermore, these optimized conditions effectively preserved the chemical quality of the product, resulting in the highest levels of phenolic compounds (TPC) at 60.87 ± 3.64 mg_{GAE}/mg. The antioxidant capacity, as assessed by the ABTS and DPPH assays, also exhibited substantial values of $63.20 \pm 4.52\%$ and $65.99 \pm 5.01\%$, respectively. The findings of this project reveal the identification of optimal conditions for processing semi-dried persimmons, leading to visually appealing products characterized by vibrant colors and a substantial abundance of antioxidants.

Keywords : Semi-dried persimmon meat , drying process , optical properties , total phenolic compounds , antioxidant capacity

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ก
บทคัดย่อ	ข
Abstract	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญภาพ	ช
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	3
1.3 ขอบเขตของการศึกษา.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 การตรวจเอกสาร	4
2.1 ข้อมูลทั่วไปของพลับ	4
2.2 การเกิดปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลในผลไม้	6
2.3 การออกแบบวิธีการฟื้นฟิวดอกสนอง	12
2.4 วิธีการหาคำตอบ และสภาวะที่เหมาะสม	19
2.5 การแก้ปัญหาด้วยวิธีการวิวิวัฒนาการโดยใช้ผลต่าง.....	21
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	26
บทที่ 3 วิธีการวิจัย สถานที่ดำเนินงานวิจัย.....	29
3.1 สารเคมีและอุปกรณ์	30
3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์	31
3.3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	32
3.4 การศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสม	42

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการทดลองและการอภิปรายผล	44
4.1 ผลกระทบของอุณหภูมิ ความเร็วลม และความเข้มข้นของสารละลาย KMS.....	44
ต่อสมบัติทางทัศนศาสตร์ในระบบสี CIE-L*a*b*	
4.2 ผลการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้งปลั๊กกิ่งแห้งด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนอง.....	48
บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ	59
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	59
5.2 ข้อเสนอแนะ	60
เอกสารอ้างอิง	61
ภาคผนวก	63
ก. การแปรรูปปลั๊กปลั๊กกิ่งแห้ง	63
ข. การวิเคราะห์ปริมาณสารประกอบฟีนอลิก และกิจกรรมต้านอนุมูลอิสระ DPPH และ ABTS	69
ค. การใช้โปรแกรม Design expert ในการวิเคราะห์ response surface methodology (RSM)	76
ง. การนำข้อมูลเชิงวิศวกรรมเพื่อนำไปใช้ในการพัฒนากระบวนการแปรรูปปลั๊กกิ่งแห้ง.....	85
ประวัติผู้ทำโครงการ.....	87

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 องค์ประกอบภายในของพลับ จำนวน 5 สายพันธุ์.....	5
2.2 ลักษณะการเก็บข้อมูลของ Central Composite Design สำหรับ 3 Factors.....	16
2.3 กลยุทธ์การสร้าง Mutant vector.....	24
3.1 ค่าปัจจัยที่ใช้ในการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม.....	42
3.2 การออกแบบการทดลองแบบ Box-Behnken Design เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม	43
4.1 ผลกระทบของอุณหภูมิ ที่ 45, 55 และ 65 องศาเซลเซียส) ที่ความเร็วลมคงที่ ที่ 0.32, , 0.54 และ 0.81 เมตรต่อวินาทีต่อคุณภาพของพลับหมาดแช่ในสารละลาย KMS เข้มข้น 500 พีพีเอ็ม ต่อสมบัติทางทัศนศาสตร์ในระบบสี CIE-L*a*b*.....	46
4.2 ผลกระทบของอุณหภูมิ ที่ 45, 55 และ 65 องศาเซลเซียส ที่ความเร็วลมคงที่ ที่ 0.32, , 0.54 และ 0.81 เมตรต่อวินาทีต่อคุณภาพของพลับหมาดแช่ในสารละลาย KMS เข้มข้น 1,000 พีพีเอ็ม ต่อสมบัติทางทัศนศาสตร์ในระบบสี CIE-L*a*b*.....	46
4.3 ผลกระทบของอุณหภูมิ ที่ 45, 55 และ 65 องศาเซลเซียส) ที่ความเร็วลมคงที่ ที่ 0.32, , 0.54 และ 0.81 เมตรต่อวินาทีต่อคุณภาพของพลับหมาดแช่ในสารละลาย KMS เข้มข้น 1,500 พีพีเอ็ม ต่อสมบัติทางทัศนศาสตร์ในระบบสี CIE-L*a*b*.....	47
4.4 สมการโพลิโนเมียลลำดับที่สองและค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยสำหรับค่าการตอบสนองของที่หลงเหลือของสภาวะที่เหมาะสมในการอบกึ่งแห้งลูกพลับ (พลับหมาด).....	58

สารบัญภาพ

ภาพ	หน้า
1.1	ผลิตภัณฑ์ปลัสดของศูนย์พัฒนาโครงการหลวงแม่แฮ
2.1	ลูกปลัสดสายพันธุ์ P2.....
2.2	พื้นที่ตอบสนองแบบกราฟฟิค
2.3	พื้นที่ตอบสนองแบบสามมิติ.....
2.4	วิธีการอย่างมีลำดับขั้นตอนของการของการวิเคราะห์พื้นที่ผิวดตอบ
2.5	การออกแบบส่วนประสมกลาง (CCD) สำหรับ k=2 และ k=3.....
2.6	การออกแบบ CCC.....
2.7	การออกแบบ CCI
2.8	การออกแบบ CCF
2.9	การค้นห Mutant Vector ของฟังก์ชัน 2 ตัวแปร
2.10	การ Crossover ของ Target Vector และ Mutant Vector ที่มีค่า D=7
2.11	กระบวนการหาค่าความเหมาะสมโดยวิธี DE จากขั้นที่ 1-4.....
3.1	เครื่องอบแห้งระบบถาดหมุน
3.2	ปลัสดสายพันธุ์ P2 ที่ใช้ในโครงการวิจัย
3.3	ขั้นตอนการเตรียมการอบแห้งปลัสด.....
3.4	ขั้นตอนการเตรียมการอบแห้งปลัสด.....
3.5	การวิเคราะห์ค่าสีด้วย เครื่อง Spectrophotometer (HunterLabModelMiniScan XE PLUS).....
3.6	ขั้นตอนการวิเคราะห์การวิเคราะห์ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกรวม.....
3.7	น้ำตาล ปริมาณสารประกอบไฮดรอกซิลเมทิลเพอร์ฟอรอล และปริมาณซัลเฟอร์ไดออกไซด์ด้วยวัดค่า ดูดกลืนแสง
3.8	ขั้นตอนการวิเคราะห์ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกรวม
4.1	เก็บเนื้อปลัสดหามาที่สภาวะการเตรียมขั้นตอน เป็นเวลา 30 วัน และนำมาตรวจวัดสารตกค้าง.....
4.2	กราฟ 3 มิติของพื้นที่ผิวดตอบสนองต่อปริมาณสารประกอบฟีนอลิก
4.3	กราฟโครงร่างของพื้นที่ผิวดตอบสนองต่อปริมาณสารประกอบฟีนอลิก
4.4	กราฟ 3 มิติของพื้นที่ผิวดตอบสนองต่อกิจกรรมต้านอนุมูลอิสระ (DPPH)
4.5	กราฟโครงร่างของพื้นที่ผิวดตอบสนองต่อกิจกรรมต้านอนุมูลอิสระ (DPPH).....
4.6	กราฟ 3 มิติของพื้นที่ผิวดตอบสนองต่อกิจกรรมต้านอนุมูลอิสระ (ABTS).....
4.7	กราฟโครงร่างของพื้นที่ผิวดตอบสนองต่อกิจกรรมต้านอนุมูลอิสระ (ABTS)

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

หมู่บ้านแม่แฮและหมู่บ้านบริเวณใกล้เคียง ในเขตตำบลแม่วิน อำเภอแม่วาง และตำบลแม่นาจร อำเภอแม่แจ่ม จังหวัดเชียงใหม่ ราษฎรที่อาศัยอยู่ส่วนใหญ่เป็นชาวเขาเผ่ากะเหรี่ยง ม้ง และจีนยูนนาน ประกอบอาชีพทำนาและทำไร่เลื่อนลอย ปลูกฝิ่น ข้าวไร่ ข้าวโพดและเลี้ยงสัตว์ตามธรรมชาติ มักจะอพยพเคลื่อนย้ายหาที่เพาะปลูกใหม่เพื่อต้องการความอุดมสมบูรณ์ของดิน โดยการบุกเบิกเขาถางป่าไม่ทุกปี อีกทั้งมีสภาพความเป็นอยู่ค่อนข้างยากจน ผลิตอาหารไม่เพียงพอแก่การบริโภค ไม่มีเส้นทางการคมนาคมติดต่อกับพื้นที่ราบหรือเชื่อมระหว่างหมู่บ้าน ปี พ.ศ.2521 พระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัว ทรงมีพระราชดำริให้พัฒนาอาชีพของประชากรชาวเขาหมู่บ้านแม่แฮและหมู่บ้านใกล้เคียง หม่อมเจ้าภีศเดช รัชนี ประธานมูลนิธิโครงการหลวง ขอให้สำนักเกษตรภาคเหนือ เป็นผู้ดำเนินงาน “โครงการหลวงพัฒนาเกษตรที่สูงแม่แฮ” ซึ่งต่อมาเปลี่ยนชื่อเป็น “ศูนย์พัฒนาโครงการหลวงแม่แฮ”

ศูนย์พัฒนาโครงการหลวงแม่แฮ ตั้งอยู่บนพื้นที่สูงจากระดับน้ำทะเล 1,300 เมตร มีพื้นที่รับผิดชอบทั้งหมด 33 ตารางกิโลเมตร ตั้งอยู่ในพื้นที่ 3 อำเภอ ได้แก่ อำเภอแม่วาง อำเภอแม่แจ่ม และอำเภอสะเมิง ครอบคลุม 24 หมู่บ้าน 1,750 ครัวเรือน พื้นที่ส่วนใหญ่เป็นเนินเขา มีที่ราบแคบตามแนวเหนือ-ใต้ของห้วยแม่แฮ และห้วยแม่เตียนอุณหภูมิลดลงเฉลี่ย 24 องศาเซลเซียส (ที่มา:<https://www.topchiangmai.com/royalproject/>)

พลับ (*Diospyros kaki* L.) เป็นไม้ผลกิ่งร้อนชนิดผลัดใบ มีถิ่นกำเนิดในประเทศจีน และแพร่กระจายไปสู่ประเทศต่างๆ เช่น ญี่ปุ่น สหรัฐอเมริกา อิตาลี บราซิล เป็นต้น สำหรับประเทศไทยเริ่มปลูกพลับมาตั้งแต่เมื่อใดไม่ปรากฏหลักฐานชัดเจน จนในปี พ.ศ. 2512 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ร่วมกับมูลนิธิโครงการหลวงได้นำพลับพันธุ์ต่างๆ เข้ามาวิจัยที่สถานีวิจัยดอยสุเทพจนประสบผลสำเร็จสามารถส่งเสริมปลูกเป็นการค้า โดยมีแหล่งปลูกที่สำคัญ ได้แก่ ศูนย์พัฒนาโครงการหลวงแม่แฮ ห้วยน้ำขุ่น อ่างาง แม่ปุนหลวง อินทนนท์ และทุ่งหลวง

พลับสามารถเจริญเติบโตและให้ผลผลิตได้ดีในพื้นที่ที่มีความสูงจากระดับน้ำทะเลตั้งแต่ 800 เมตรขึ้นไป พันธุ์พลับที่ปลูกในประเทศไทยมีหลายพันธุ์ แต่โดยทั่วไปแบ่งพลับออกเป็น 2 ประเภท คือ พลับหวาน และพลับฝาด โดยพลับหวาน เช่น พลับพันธุ์ ‘Fuyu’ และ ‘Fuyu Wase’ พื้นที่ปลูกต้องมีความหนาวเย็นเพียงพอ โดยพื้นที่ต้องมีความสูงจากระดับน้ำทะเล 1,000 เมตรขึ้นไป ส่วนพลับฝาดโดยเฉพาะพลับพันธุ์ ‘P2’ สามารถปรับตัวเข้ากับสภาพภูมิอากาศบนพื้นที่สูงของภาคเหนือได้ดี แม้ในพื้นที่ที่ค่อนข้างแห้งแล้ง ทำให้มีการปลูกพลับฝาด โดยเฉพาะ พันธุ์ ‘P2’ อย่างแพร่หลายในหลายพื้นที่ที่มีความสูงจากระดับน้ำทะเลตั้งแต่ 800 เมตรขึ้นไป ทำให้ผลผลิตพลับที่ออกจำหน่ายในท้องตลาดมากกว่าร้อยละ 90 ของปริมาณพลับบนพื้นที่สูงของประเทศไทยเป็นพลับ

พันธุ์ 'P2' ข้อมูลจากงานวิจัยและพัฒนาไม้ผลในปี 2564 มีปริมาณผลพันธุ์ 'P2' ในพื้นที่โครงการหลวงมากกว่า 1,200 ตัน ในพื้นที่ ศูนย์พัฒนาโครงการหลวงแม่แฮ แม่ปุนหลวง ห้วยน้ำขุ่น อินทนนท์ ห้วยสั้มป่อย เป็นต้น โดยศูนย์พัฒนาโครงการหลวงแม่แฮมีปริมาณผลผลิตพันธุ์ 'P2' ในพื้นที่ มากกว่า 900 ตัน ต่อปี จำแนกเป็น ผลผลิตจำหน่ายผ่านมูลนิธิโครงการหลวง มีประมาณ 50-60 ตัน คิดเป็นร้อยละ 6 ของปริมาณผลพันธุ์ 'P2' ในพื้นที่ และผลผลิตที่เกษตรกรจำหน่ายเอง มีประมาณ 940 ตัน



(ก)



(ข)

ภาพ 1.1 ผลผลิตพันธุ์ผลสดของศูนย์พัฒนาโครงการหลวงแม่แฮ (ก) ผลผลสด (ข) ผลสดบรรจุสุญญากาศ

ข้อมูลผลการดำเนินการปลูกของศูนย์พัฒนาโครงการหลวงแม่แฮ มีแผนในการรับซื้อผลสดพันธุ์ P2 ปริมาณ 60 ตัน แบ่งเกรดออกตามขนาด ได้แก่ ผลเกรด A มีขนาด 10x10 ตารางเซนติเมตร, ผลเกรด B มีขนาด 8x8 ตารางเซนติเมตร และผลเกรด C นั้นมีขนาด 6x6 ตารางเซนติเมตร ตามลำดับ โดยราคารับซื้อเท่ากับ 25-30 บาทต่อกิโลกรัม (ขึ้นอยู่กับขนาดเกรด) เพื่อนำไปบรรจุในสภาวะสุญญากาศและจัดจำหน่ายในตลาดกลางผลไม้ในราคา 32-35 บาท แต่ในปี 2564 ทางศูนย์ฯ แม่แฮสามารถส่งจำหน่ายได้เพียง 34 ตันสดเท่านั้น จำเป็นปล่อยเน่าเสียไป 26 ตันสด ส่งผลให้ศูนย์พัฒนาโครงการหลวงแม่แฮขาดทุนเท่ากับ 780,000 บาท ในขณะที่การดำเนินเพาะปลูกผลสดนอกเหนือจากศูนย์ฯ แม่แฮนั้น พื้นที่ปลูกผลสดจำนวน 1 ไร่ มีต้นผลเฉลี่ย 350 ± 32 ต้น โดยแต่ละต้นให้ผลผลิตเฉลี่ยเท่ากับ 125 ± 33.2 กิโลกรัม ดังนั้นผลผลิตผลสดมีค่าเท่ากับ $43,750 \pm 320$ กิโลกรัมต่อไร่ โดยปัจจุบันพ่อค้าคนกลางเข้ามาสั่งซื้อเหมาสวนในราคา 6,000 บาทต่อไร่มีราคารับซื้อในปี 2565 เพียง 7.29 บาทต่อกิโลกรัมสด (ข้อมูลจากโครงการหลวงแม่แฮ ประจำปี 2565) ส่งผลให้เกษตรกรปล่อยให้ผลเน่าเสียคาดกันเท่ากับเกิดความเสียหายเท่ากับ 5,950,000 บาทต่อฤดูกาล ในขณะที่ปลูกผลสดพันธุ์ P2 ที่มีขนาดเล็กกว่า 5x5 ตารางเซนติเมตรนั้นไม่สามารถนำไปขาย ปัจจุบันเกษตรกรคัดผลขนาดเล็กกว่า 5x5 ตารางเซนติเมตรทิ้ง หรือถูกนำไปเป็นอาหารสัตว์เมื่อมาคำนวณปริมาณของผลสดพันธุ์ P2 ขนาดเล็กกว่า 5x5 ตารางเซนติเมตร ประมาณ 30 เปอร์เซ็นต์ของปริมาณผลสด หรือประมาณ 13 ตันสด ดังนั้นนอกจาก

ปัญหาที่เกี่ยวกับการขายปลัสดไม้ทันทันยังมีปัญหาเกี่ยวปลัสดตกเกรด (ปลัสดขนาดเล็กกว่า 5x5 ตาราง เซนติเมตร) เป็นปัจจัยที่สำคัญมากที่ส่งผลให้ราคาปลัสดตกต่ำมากที่สุดในรอบ 20 อย่างไรก็ตาม โดยหลักสูตร วิศวกรรมฟาร์มอัจฉริยะและนวัตกรรมเกษตรได้รับทุนอุดหนุนงานวิจัย จาก สวก. ประจำปีงบประมาณ 2565 ในการพัฒนากระบวนการพัฒนากระบวนการผลิตปลัสด โดยแบ่งงานออกเป็นสองส่วนได้แก่ การพัฒนาเครื่อง อบแห้งปลัสดขนาด 200-250 กิโลกรัม จำนวนสามเครื่อง ติดตั้งที่ศูนย์พัฒนาโครงการหลวงแม่แฮ จังหวัดเชียงใหม่ อย่างไรก็ตามยังไม่มีการศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้งต่อคุณภาพของปลัสด ดังนั้นการดำเนินโครงการ วิศวกรรมนี้ได้ศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิ ความเร็วลม และความเข้มข้นของสารป้องกันการเปลี่ยนแปลงเป็นสี น้ำตาล ต่อคุณภาพที่ของปลัสดอบแห้งด้วยการใช้ บ็อกซ์-เบห์นเคน (box-behnken design BBD) เพื่อวิเคราะห์ หารูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต้น และตัวแปรตาม ในรูปแบบสมการทางคณิตศาสตร์

1.2 วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิ (45, 55 และ 65 องศาเซลเซียส) , ความเร็วลม (0.32, 0.54 และ 0.81 เมตรต่อวินาที) และความเข้มข้นของปริมาณสารป้องกันการเกิดสีน้ำตาล (INS224) ที่ความเข้มข้น 500, 1,000 และ 1,500 พีพีเอ็ม ต่อคุณภาพของปลัสดหมาดสมบัติทางกายภาพ (สมบัติเชิงทัศนศาสตร์ในระบบสี CIE-L*a*b*) และคุณภาพด้านเคมีของปลัสดอบแห้ง (ปริมาณสารประกอบฟีนอลิก และกิจกรรมต้านอนุมูลอิสระ DPPH และ ABTS) ด้วยวิธีทางสถิติ พื้นที่ผิวตอบสนองโดยใช้ บ็อกซ์-เบห์นเคน (box-behnken design BBD)

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 ศึกษากระบวนการแปรรูปปลัสดหมาดด้วยการอบแห้งลมร้อน ขนาด 250-300 กิโลกรัม ณ ศูนย์ พัฒนาโครงการหลวงแม่แฮ จังหวัดเชียงใหม่

1.3.2 วิเคราะห์ค่าความชื้นเริ่มต้น อัตราการอบแห้ง พลังงานจำเพาะที่ใช้ในการอบแห้ง และสมบัติทาง เคมี-กายภาพของปลัสดอบแห้ง (สมบัติเชิงทัศนศาสตร์ในระบบสี CIE-L*a*b* และปริมาณสารประกอบฟีนอลิก) ที่สภาวะต่างๆ

1.3.3 การวิเคราะห์ข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต้น ได้แก่ อุณหภูมิ, ความเร็วลม และความเข้มข้น ของปริมาณสารป้องกันการเกิดสีน้ำตาล (INS224) ต่อสมบัติเชิงทัศนศาสตร์ในระบบสี CIE-L*a*b* ปริมาณ สารประกอบฟีนอลิก และกิจกรรมต้านอนุมูลอิสระ (DPPH และ ABTS) ด้วยวิธีทางสถิติ พื้นที่ผิวตอบสนอง

1.4. ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

นำข้อมูลเชิงวิศวกรรมเพื่อนำไปใช้ในการพัฒนากระบวนการแปรรูปปลัสดหมาด ณ สถานประกอบการจริง อย่างมีประสิทธิภาพ

บทที่ 2

การตรวจเอกสาร

2.1 ข้อมูลทั่วไปของพลับ

2.1.1 ข้อมูลพื้นฐานของพลับ

จรรยา และพหล (2537) ได้ศึกษาสายพันธุ์ที่เหมาะสม และกรรมวิธีการทำลูกพลับอบแห้ง และลูกพลับอบแห้งเพื่อการค้า ได้อธิบายเนื้อหาสำคัญพลับซึ่งเป็นพันธุ์ไม้ผลยืนต้นขนาดใหญ่ มีการเจริญเติบโตดี ลำต้นมีผิวหยาบกร้าน ขรุขระ สีน้ำตาลแก่ ใบมีสีเขียวเป็นรูปหัวใจ ดอกคล้ายระฆังสีเหลืองอ่อน ผลพลับมีรูปร่างต่างๆ กัน เช่น กลมหรือกลมแบน กลมยาวคล้ายรูปกรวย ผลอ่อนสีเขียวอ่อน เมื่อผลแก่จะเปลี่ยนสีเหลือง เนื้อผลแข็งเมื่อสุกเต็มที่จะเป็นสีแดงส้ม เนื้อผลนิ่ม เมล็ดสีน้ำตาลแก่ พลับบางพันธุ์มีรสฝาด โดยความแตกต่างเรื่องรสชาติสามารถจำแนกพลับเป็นสองกลุ่มใหญ่ คือ

2.1.1 พลับฝาด (Astringent) เมื่อผลยังไม่สุกมีรสฝาด ถ้าหวานสามารถนำไปรับประทานแต่จำเป็นต้องผ่านกรรมวิธีการลดความฝาดเสียก่อน เมื่อสุกเต็มที่มีสีแดงส้ม เนื้อผลนิ่ม รสหวาน เช่น พันธุ์ Tanenashi, Ha chiya และ Tsuru

2.1.2 พลับหวาน (Sweet or Non-astringent) พลับสายพันธุ์นี้มีรสหวานกรอบไม่ฝาด แม้เก็บมาจากต้น สามารถนำไปรับประทานได้เลย เช่น พันธุ์ฟูย เป็นต้น

พลับ มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า Diospyros kaki L. เป็นผลไม้ที่มีประโยชน์ต่อสุขภาพให้แคลอรีต่ำ เส้นใยอาหารสูง ประกอบไปด้วยสารต่อต้านอนุมูลอิสระซึ่งช่วยเรื่องการชะลอริ้วรอย และเสริมสร้างภูมิคุ้มกันโรค ต้นพลับถูกนำเข้ามาเพาะปลูกครั้งแรกในประเทศไทยเมื่อปี พ.ศ. 2471 โดยนำเข้ามาจากประเทศจีน ปัจจุบันพลับเป็นที่นิยมปลูกในเขตภาคเหนือของประเทศไทยในจังหวัดเชียงใหม่และเชียงรายเนื่องจากมีสภาพอากาศหนาวเย็นเหมาะสมแก่การเพาะปลูก โดยมีมูลนิธิโครงการหลวงเป็นหน่วยงานที่ให้การสนับสนุน พันธุ์พลับที่นิยมปลูกส่วนใหญ่จะมีทั้งพลับฝาด (Astringent) ซึ่งผลจะมีรสฝาด เพราะมีสารแทนนินชนิดละลายน้ำได้เป็นส่วนประกอบอยู่ ตัวอย่างพันธุ์พลับฝาดได้แก่ พันธุ์ซือโจ หรือ P2 พันธุ์ฮาชิยาและพันธุ์โทเนวาเซ่ เป็นต้น และนอกจากนี้พลับอีกชนิดหนึ่ง คือ พลับหวาน (Non-Astringent) ผลจะมีรสหวานไม่มีรสฝาด ตัวอย่างพันธุ์พลับหวานได้แก่พันธุ์ฟูย พันธุ์จิตร พันธุ์ฮิและพันธุ์เฮียะคุมะ เป็นต้น พลับจะออกผลในช่วงระยะเวลาที่จำกัด คือ ช่วงเดือนกรกฎาคมถึงกันยายนซึ่งตรงกับช่วงฤดูฝนของประเทศไทย จึงประสบปัญหาการนำพลับออกมาจากจำหน่าย เนื่องจากแหล่งเพาะปลูกพลับส่วนใหญ่จะอยู่ในแถบภูเขาสูงการคมนาคมจึงไม่สะดวกส่งผลให้เกิดการเน่าเสียของผลผลิตพลับขึ้น



ภาพ 2.1 ลูกพลับสายพันธุ์ P2

ปัจจุบันประเทศไทยสามารถปลูกพันธุ์ Tanenashi, Ha chiya และ Tsuru ซึ่งเป็นพลับฝาด (Astringent) รายงานวิจัยของฝ่ายวิจัยและพัฒนาโครงการหลวง พบว่าปัจจุบันจำนวนต้นพลับที่ปลูกในพื้นที่ของ ศูนย์พัฒนาโครงการหลวง ประมาณ 24,235 ต้น

ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบภายในของพลับ จำนวน 5 สายพันธุ์

สายพันธุ์ของ ลูกพลับ	Total solid (%)	ash (%)	โปรตีน (%)	น้ำตาล (%)	แทนนิน (%)
Hoshiya	24.06	0.47	0.64	17.71	0.88
Tanenashi	18.52	0.77	0.42	14.57	0.13
Triumph	20.86	0.41	0.40	14.74	0.33
Tsuru	21.08	0.46	0.61	14.46	1.54
Zengi	21.87	0.49	0.73	14.72	0.41

2.1.2. กรรมวิธีการลดความฝาดของพลับ

พลับฝาด (Astringent) มีรสฝาดซึ่งเกิดจากสารแทนนิน (Tannin) ละลายอยู่ในเนื้อของผลพลับ เมื่อพลับ เมื่อสุก สารแทนนินจะค่อยๆ เปลี่ยนแปลงไปจนกระทั่งเมื่อผลสุกเต็มที่ เนื้อนิ่ม และรสฝาดหายไป อย่างไรก็ตาม การสุกโดยธรรมชาติใช้เวลานาน ปัจจุบันกรรมวิธีการลดความฝาดของพลับ สามารถทำได้หลายวิธี เช่น การใช้ปูน ใส การใช้แอลกอฮอล์ การรมด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และการแก๊สเอซีทีลีน หรือ แคลเซียมคาร์ไบด์ (Calcium carbide)

2.2 การเกิดปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลในผลไม้

การแปรรูปและเก็บรักษาผลิตภัณฑ์อาหารสามารถก่อให้เกิดปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาล(browning reaction) ในอาหารได้ ซึ่งแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ ปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลที่เกี่ยวข้องกับเอนไซม์ (enzymatic browning reaction) และปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลที่ไม่เกี่ยวข้องกับเอนไซม์ (non-enzymatic browning reaction)

2.2.1 ปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลที่เกี่ยวข้องกับเอนไซม์ (enzymatic browning reaction)

การเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลเนื่องจากเอนไซม์ เป็นปฏิกิริยาที่สำคัญที่ก่อให้เกิดลักษณะที่ไม่ดีในผลิตภัณฑ์ พบมากในผักและผลไม้สด ซึ่งปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลที่เกี่ยวข้องกับเอนไซม์จะเกิดขึ้นกับเนื้อเยื่อของผักและผลไม้เมื่อเซลล์ถูกทำลายทางกล เช่น การปอกเปลือกหรือการหักทำให้สารประกอบโมโนฟีนอลที่อยู่ภายในเซลล์สัมผัสกับออกซิเจนในอากาศและมีเอนไซม์โพลิฟีนอลออกซิเดส (PPO) เป็นตัวเร่งทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮดรอกซิเลชันได้เป็นออร์โทไดฟีนอล (o-diphenol) สารนี้ถูกออกซิไดส์ต่อไปเป็นออร์โทควิโนน (o-quinone) โดยสารควิโนนที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาที่เร่งด้วยเอนไซม์โพลิฟีนอลออกซิเดสนี้ จะรวมตัวกันและเกิดปฏิกิริยาเมลลาร์ดกับสารประกอบฟีนอลอื่นๆหรือกรดอะมิโนได้เป็นสารประกอบเชิงซ้อนสีน้ำตาล (นิธิยา, 2545)

ซึ่งปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลเนื่องจากเอนไซม์ในผักและผลไม้ ได้แก่ความเข้มข้นของเอนไซม์ และสารประกอบฟีนอลที่เป็นสับสเตรท ความเป็นกรด - ด่าง ออกซิเจน และอุณหภูมิ เป็นต้น (ศิวาพร, 2535) สับสเตรทที่ถูกออกซิไดส์ได้ด้วยเอนไซม์โพลิฟีนอลออกซิเดส ได้แก่ สารประกอบฟีนอล ซึ่งเป็นสารฟลาโวนอยด์ เช่นแอนโทไซยานินิน ลูโคแอนโทไซยานินิน ฟลาโวนอล แคทีคอล กรดคาเฟอิก กรดคลอโรจีนิก แคทีชินเอสเทอร์ของกรดซินนามิก 3,4 - ไฮดรอกซีฟีนิล อะลานีน และไทโรซีน เป็นต้น ความเป็นกรด-ด่างที่เหมาะสมสำหรับเอนไซม์ที่ไม่คงตัวถูกทำลายได้ด้วยความร้อนและถูกยับยั้งได้ด้วยกรดแอสคอร์บิก กรดฟีนอลิกซัลไฟด์ คีเลตติ้งเอเจนต์และรีดิวซิงเอเจนต์ เช่น กรดแอสคอร์บิก (ascorbic acid) และซิสเทอีน (cysteine) เป็นต้น

2.2.2 ปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลที่ไม่เกี่ยวข้องกับเอนไซม์ (non-enzymatic browning reaction)

ปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลที่ไม่เกี่ยวข้องกับเอนไซม์หรือปฏิกิริยาเมลลาร์ดจะเกิดขึ้นเมื่ออาหารทุกชนิดได้รับความร้อน จึงเกิดการสูญเสียน้ำ (dehydration) การสลายตัว (degradation) และการรวมตัวกัน (codensation) ของหมู่อะมิโนกับสารประกอบรีดิวซิงและพัฒนาเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่มีสีเหลืองจนถึงสีน้ำตาลและน้ำตาลแดง ทำให้อาหารมีกลิ่นและรสชาติเฉพาะ ซึ่งการเกิดปฏิกิริยาเมลลาร์ดของอาหารแต่ละชนิดเมื่อได้รับความร้อนจะทำให้มีทั้งสีกลิ่นและรสชาติที่เกิดขึ้นแตกต่างกัน และปฏิกิริยานี้จะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูงและจะแปรผันตามระยะเวลาและอุณหภูมิที่ใช้

โดยทั่วไปปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลที่ไม่เกี่ยวข้องกับเอนไซม์ในผลิตภัณฑ์ผัก ผลไม้และอาหารสามารถจำแนกได้ดังต่อไปนี้

- การเกิดปฏิกิริยาคาราเมลไลเซชัน (caramelization reaction)

การเกิดปฏิกิริยาคาราเมลไลเซชันเป็นการเกิดสีน้ำตาลที่มีน้ำตาลเป็นสารตั้งต้น เมื่ออยู่ในสภาวะที่ได้รับความสูงและเกิดการสูญเสียน้ำ โดยไม่มีสารประกอบพวกอะมิโน หรือโปรตีน ซึ่งน้ำตาลบริสุทธิ์จะเกิดคาราเมลไลเซชันอย่างรวดเร็วที่อุณหภูมิสูงกว่า 100 องศาเซลเซียส โดยมีตัวเร่งปฏิกิริยาดังนี้ phosphate alkalis acids และเกลือของกรดคาร์บอกซิลิก เช่นซิเตรตฟอสเฟตทาร์เตรต และมาเลต เป็นต้น สำหรับการเกิดปฏิกิริยาจะคล้ายกับการเกิดสีน้ำตาลระหว่างน้ำตาลและกรดอะมิโน แต่เปลี่ยนเป็น enolizationdehydration และแตกตัวเป็นไฮดรอกซิลเมทอลฟอร์ฟูรอล

- การเกิดปฏิกิริยาเมลลาร์ด (maillard reaction)

การเกิดปฏิกิริยาเมลลาร์ดเป็นการจำกัดอายุการเก็บของน้ำผักและไม้มารวมถึงผักและผลไม้แห้งหลายชนิด นอกจากนี้ ยังมีการเกิดสีน้ำตาลที่เป็นผลมาจากการเสื่อมสลายของน้ำตาลหรือเกิดจากการออกซิเดชันของกรดแอสคอร์บิกแล้วเกิดปฏิกิริยาของสารประกอบคาร์บอนิลโดยผ่านกระบวนการอัลโดคอนเดนชัน (aldol condensation) หรือเกิดปฏิกิริยากับหมู่อะมิโนให้ผลลัพธ์เป็นสารสีน้ำตาลซึ่งเกิดสีน้ำตาลแบบไม่ใช้เอนไซม์ในอาหารจะขึ้นอยู่กับสารตั้งต้นของการเกิดปฏิกิริยาเมลลาร์ด (maillard precursor) หรือวิตามินซี ความเป็นกรด-ด่างค่ากิจกรรมของน้ำออกซิเจนเวลาและอุณหภูมิในการเก็บรักษา ปฏิกิริยาเมลลาร์ดเกิดจากปฏิกิริยาของน้ำตาลรีดิวส์ ทั้งคีโตสและแอลโดสที่รวมกับหมู่อะมิโนได้เป็นไกลโคซิลเอมีน (N-substituted glycosylamine) เกิดปฏิกิริยาดีไฮเดรชันได้เป็นอิมีน (imine หรือ Schiff base) จากนั้น มีการเรียงตัวใหม่เรียกว่า amadori rearrangement ได้เป็นแอลโดสเอมีน (aldoseamine) หรือคีโตสเอมีน (ketoseamine) เรียกว่า amadori product เกิดปฏิกิริยา enolization ของ amadori products แล้วได้เป็นคีโตสเอมีน หรือไดอะมิโนซูการ์เกิดปฏิกิริยาดีไฮเดรชันต่อไปได้เป็นอนุพันธ์ของฟูเรน (furan) ถ้าเป็นน้ำตาลเฮกโซสอนุพันธ์ฟูเรนคือ 5-ไฮดรอกซิลเมทิล-2-เฟอร์ลดีไฮด์(5-hydroxymethyl-2-furaldehyde หรือไฮดรอกซิลเมทิลเฟอร์ฟูรอล หรือ HMF) แสดงดังรูป 5 อนุพันธ์แรมวงแหวน เช่น 5-ไฮดรอกซิลเมทิล-2-เฟอร์ลดีไฮด์จะเกิดพอลิเมอร์ไรซ์อย่างรวดเร็วได้เป็นสารสีน้ำตาลที่มีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบอยู่ด้วยและไม่ละลายน้ำซึ่งต่างจากการเกิดคาราเมลไลเซชันที่มีน้ำตาลเพียงอย่างเดียวพบได้ในอาหารที่มีน้ำตาลรีดิวส์ซึ่งกรดอะมิโนโปรตีนหรือสารประกอบไนโตรเจนสารสีน้ำตาล

- ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาเมลลาร์ด (Sapers, 1993)
- ปริมาณสารตั้งต้น สารตั้งต้นที่ทำให้เกิดปฏิกิริยา ได้แก่ ปริมาณน้ำตาลและกรดอะมิโนในผลิตภัณฑ์ หากปริมาณสารตั้งต้นมาก อัตราการเกิดปฏิกิริยาจะเพิ่มขึ้นและเกิดสารชนิดหนึ่ง เรียกว่าเมลานอยดิน (Fennema, 1996) เพิ่มขึ้น ทำให้เกิดสี

น้ำตาลเพิ่มขึ้น ดังนั้นอาจควบคุมการเกิดปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลได้โดยการควบคุมปริมาณของน้ำตาลรีดิวซ์และกรดอะมิโนในวัตถุดิบ เช่น การกำหนดระยะเวลาในการเก็บเกี่ยวก่อนนำมาแปรรูป

2) น้ำตาล สารประกอบคาร์บอนิลและเอมีนที่มีความคงตัวต่ำและสลายตัวได้ง่าย จึงเกิดปฏิกิริยาเมลลาร์ดได้ที่อุณหภูมิห้องอาหารที่มีน้ำตาลรีดิวซ์สูงจะเกิดปฏิกิริยาเมลลาร์ดได้อย่างรวดเร็ว

3) กรดอะมิโน ชนิดของกรดอะมิโนมีผลต่ออัตราเร็วของปฏิกิริยาเมลลาร์ดกรดอะมิโนชนิดแอลฟา (α -amino acids) เช่นไกลซีนจะเกิดปฏิกิริยาเมลลาร์ดได้ดีที่สุด และเมื่อกรดอะมิโนมีขนาดโมเลกุลใหญ่ขึ้นจะเกิดปฏิกิริยาช้าลงกรดอะมิโนชนิดโอเมก้า (ω -amino acids) เกิดปฏิกิริยาเมลลาร์ดได้รวดเร็วขึ้นเมื่อความยาวของสายโมเลกุลเพิ่มขึ้นเช่น ออร์นิตินเกิดได้เร็วกว่าไลซีนหมู่เอมีโนในโมเลกุลของไลซีนจะเกิดปฏิกิริยาได้เร็วที่สุด สำหรับกรดอะมิโนที่มีสมบัติเป็นต่างเช่นไลซีนและกรดอะมิโนที่เป็นอนุพันธ์เอไมด์ เช่น แอสพาราจีน และกลูตามีนจะเกิดปฏิกิริยาได้ดีกว่ากรดอะมิโนที่มีสมบัติเป็นกรดและเป็นกลาง

4) อุณหภูมิ อัตราเร็วของปฏิกิริยาเมลลาร์ดจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น และภาวะที่สารมีความเข้มข้นสูงและอุณหภูมิสูง ปฏิกิริยาจะเกิดได้รวดเร็วที่สุดเนื่องจากเกิด autocatalytic และเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นทุก 10 องศาเซลเซียส อัตราเร็วของปฏิกิริยาจะเพิ่มขึ้นเป็น 2-3 เท่าซึ่งอาหารที่มีน้ำตาลฟรุกโทสจะทำให้อัตราเร็วเพิ่มขึ้นเป็น 5-10 เท่า และเพิ่มเร็วขึ้นเมื่อมีปริมาณน้ำตาลมากขึ้น นอกจากนี้ความเข้มข้นของสีน้ำตาลจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นด้วยดังนั้นการเก็บรักษาอาหารที่อุณหภูมิต่ำจึงเป็นการชะลอการเกิดปฏิกิริยาเมลลาร์ดให้ช้าลง

5) ความเป็นกรด-ด่าง การลดค่าความเป็นกรด-ด่างให้ต่ำลงเช่นที่ค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 3 น้ำตาลจะมีความคงตัวมากที่สุด ซึ่งจะอยู่ในรูป pyranosehemiacetal ring เมื่อความเป็นกรด-ด่างสูงขึ้นน้ำตาลจะเปลี่ยนเป็นรูป reactive acyclic aldehyde ทำให้เกิดปฏิกิริยารวมกันระหว่างน้ำตาลและเอมีนได้อย่างรวดเร็ว

6) ค่ากิจกรรมของน้ำ ปฏิกิริยาเมลลาร์ดเกิดได้ดีในผลิตภัณฑ์ที่มีความชื้นสูงเนื่องจากน้ำทำให้สารตั้งต้นเคลื่อนที่ได้เร็วจึงทำให้สามารถทำปฏิกิริยากันได้มากขึ้น ดังนั้นในผลิตภัณฑ์ที่เป็นของแข็งอาจควบคุมการเกิดปฏิกิริยาได้โดยทำการแห้ง เพื่อลดความชื้นภายในผลิตภัณฑ์ และควบคุมค่ากิจกรรมของน้ำในผลิตภัณฑ์เนื่องจากจะสามารถลดการเคลื่อนที่ของสารตั้งต้น ทำให้โอกาสในการทำปฏิกิริยาระหว่างสารตั้งต้นลดน้อยลง และในส่วนของผลิตภัณฑ์ที่เป็นสารละลายอาจเติมน้ำเพื่อเจือจางสารตั้งต้น และลดโอกาสที่สารตั้งต้นมาเจอกันและทำปฏิกิริยากัน

7) ออกซิเจน ปฏิกริยาเมลลาร์ดสามารถเกิดได้ในสภาวะที่ไม่มีออกซิเจนเนื่องจากออกซิเจนออกซิไดซ์สารอื่นให้อยู่ในรูปที่ไวต่อปฏิกริยา ได้แก่ ไอออนทองแดง เหล็ก และสังกะสี ดังนั้นการเลือกบรรจุภัณฑ์เหมาะสมจะควบคุมการเกิดสีน้ำตาลได้ (นิธิยา, 2545)

2.2.3 การยับยั้งปฏิกริยาการเกิดสีน้ำตาลในผักและผลไม้

ปฏิกริยาการเกิดสีน้ำตาลที่เกี่ยวข้องกับเอนไซม์ในผักและผลไม้ มีผลทำให้สีของผลิตภัณฑ์เปลี่ยนแปลงไป ทั้งยังทำให้รสชาติและผลไม้บางชนิดเปลี่ยนแปลงไปด้วยอาจมีผลทำให้คุณภาพของผลิตภัณฑ์ลดลง และไม่เป็นที่ยอมรับของผู้บริโภค ซึ่งการควบคุมไม่ให้เกิดปฏิกริยาการเกิดสีน้ำตาลที่เร่งด้วยเอนไซม์ สามารถทำได้หลายวิธี โดยจะต้องเลือกใช้ให้เหมาะสมกับผลิตภัณฑ์แต่ละชนิด ดังนี้

2.2.3.1 การใช้ความดัน

การใช้ความดันประมาณ 5 บาร์ สามารถทำให้เอนไซม์เสียสภาพธรรมชาติแบบไม่สามารถแปรผันกลับได้ (irreversible) เนื่องจากสามารถทำลายแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่ไม่ชอบน้ำ (hydrophobic interaction) และพันธะเกลือภายในโมเลกุล (intramolecular salt bridges) ทำให้โครงสร้างตติยภูมิของเอนไซม์เปลี่ยน เอนไซม์จึงไม่สามารถทำงานได้ (Cheftel, 1992) แต่อาจส่งผลเสียต่อกลิ่นรส รสชาติ เนื้อสัมผัส และคุณค่าทางอาหารของผลิตภัณฑ์

2.2.3.2 การกำจัดหรือลดออกซิเจน

เนื่องจากปฏิกริยาการเกิดสีน้ำตาลทั้งที่เกี่ยวข้องและไม่เกี่ยวข้องกับเอนไซม์ สามารถเกิดขึ้นได้เมื่อมีออกซิเจน ดังนั้นจึงสามารถยับยั้งไม่ได้เกิดปฏิกริยาได้โดยแยกออกซิเจนออกจากการสัมผัสผลิตภัณฑ์ โดยอาจจะเติมสารละลายน้ำตาล หรือน้ำเชื่อม เพื่อลดการละลายออกซิเจนในเนื้อผลไม้ และลดการแพร่ออกซิเจนจากอากาศเข้าสู่เนื้อผลไม้ หรือการบรรจุผักผลไม้และผลิตภัณฑ์ในสภาพดัดแปลงบรรยากาศ เช่น บรรจุแก๊สผสมระหว่างคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ในปริมาณร้อยละ 20 และไนโตรเจน (N_2) ในปริมาณร้อยละ 80 ก็可以帮助ชะลอการเกิดสีน้ำตาลได้ (Sapers, 1993)

2.2.3.3 การใช้อุณหภูมิต่ำ

การใช้อุณหภูมิต่ำสามารถชะลอการเกิดสีน้ำตาลได้ โดยการชะลอการทำงานของเอนไซม์เนื่องจากการใช้อุณหภูมิต่ำช่วยลดอัตราการเมตาบอลิซึม และลดอัตราการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ซึ่งผักและผลไม้แต่ละชนิดต่างต้องเลือกใช้อุณหภูมิต่ำที่เหมาะสม และแตกต่างกันไป หากใช้อุณหภูมิต่ำเกินไปจะส่งผลเสียจากการสะท้อนหนาว (chilling injury) ได้โดยทำให้เกิดรอยแผลสีน้ำตาลหรือดำบนผิวหรืออาจเป็นรอยบวมลงไป เนื่องจากเซลล์บริเวณนั้นตาย (จริงแท้, 2541) มีการศึกษาพบว่า การเก็บรักษาผลแอปเปิ้ล 12 พันธุ์ ที่อุณหภูมิต่ำ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 วัน ทำให้เกิดสีน้ำตาลช้าลง และพบว่าการเก็บรักษาเนื้อผลแอปเปิ้ลที่ตัดแบ่งชิ้นไว้ที่อุณหภูมิต่ำสามารถชะลอการเกิดสีน้ำตาลได้ และจะมีประสิทธิภาพดียิ่งขึ้นหากแช่ในกรดแอสคอร์บิกและแคลเซียมก่อนการเก็บรักษา

2.2.3.4 การใช้ความร้อนหรือการลวก

การใช้ความร้อนเป็นวิธีการพื้นฐานที่ช่วยในการยับยั้งกิจกรรมของเอนไซม์ เนื่องจากความร้อนจะทำให้เอนไซม์เสียสภาพตามธรรมชาติไม่สามารถเร่งปฏิกิริยาได้ จึงทำให้ไม่สามารถเกิดสีน้ำตาลได้ ซึ่งเอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดสในวัตถุดิบแต่ละชนิดจะเสถียรต่อความร้อนที่แตกต่างกันซึ่งอุณหภูมิและเวลาที่มีความสัมพันธ์กันอย่างมากระหว่างการใช้ความร้อนในกระบวนการพรีทรีตเมนต์ก่อนการแปรรูปอาหาร โดยปัจจัยเหล่านี้จะขึ้นอยู่กับปริมาณเอนไซม์ที่มีในวัตถุดิบนั้นๆแต่การใช้ความร้อนหรือการลวกอาจทำให้เนื้อผลไม้เน่า และมียีสปนเปื้อนเปลี่ยนแปลงไป

Valle และคณะ (1998) ได้ศึกษาผลของการลวกต่อกิจกรรมของเอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดสในเนื้อแอปเปิ้ลอบแห้ง โดยการลวกเนื้อแอปเปิ้ลในน้ำเดือดอุณหภูมิ 97.3 องศาเซลเซียส และการลวกด้วยไอน้ำเดือดอุณหภูมิ 97.3 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 และ 60 วินาที ตามลำดับ และลวกในน้ำร้อนที่อุณหภูมิ 40, 55 และ 65 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15, 30 และ 60 วินาที ตามลำดับ พบว่ากิจกรรมของเอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดสจะลดลงร้อยละ 25-89 ซึ่งขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของตัวกลางและเวลาในการลวก และการใช้ไอน้ำมีประสิทธิภาพมากกว่าไอน้ำ เนื่องจากสามารถถ่ายเทความร้อนไปสู่วัตถุดิบได้ดีกว่า และใช้เวลาในการลวก 60 วินาที สามารถลดกิจกรรมของเอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดสได้มากกว่าการลวกนาน 30 วินาที ร้อยละ 24

Kumar และคณะ (2008) ทำการทดลองใช้ความร้อนในการยับยั้งกิจกรรมของเอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดสในเชอรี่ โดยการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 45, 55, 65, 75 และ 85 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 30 นาที พบว่า เอนไซม์มีความคงตัวที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส แต่ไม่มีความคงตัวที่อุณหภูมิสูงกว่า 75 องศาเซลเซียส โดยกิจกรรมของเอนไซม์จะลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น เนื่องจากการคลายตัวของโครงสร้างตติยภูมิ

Waliszewski และคณะ (2009) ทำการทดลองยับยั้งกิจกรรมของเอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดสในเมล็ดวานิลลา โดยใช้ความร้อนที่อุณหภูมิ 60, 65, 70, 75, 80 และ 85 องศาเซลเซียส ซึ่งพบว่าการยับยั้งกิจกรรมของเอนไซม์จะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น โดยการใช้ความร้อนที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 18 นาที สามารถยับยั้งกิจกรรมของเอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดสในเมล็ดวานิลลาได้ดีที่สุด

2.2.3.5 การใช้สารเคมี

การใช้สารเคมีในผัก และผลไม้อบแห้ง มีวัตถุประสงค์เพื่อช่วยปรับปรุงคุณภาพด้านต่างๆในอาหาร โดยไม่มีผลกระทบต่อคุณสมบัติและคุณค่าทางอาหาร กลุ่มสารเคมีที่นำมาใช้ในอาหาร ได้แก่ กรดซิตริก กรดแอสคอร์บิก และ สารประกอบซัลไฟต์ เป็นต้น ซึ่งในงานวิจัยครั้งนี้ได้มุ่งเน้นศึกษาเกี่ยวกับการใช้สารประกอบซัลไฟต์ในการผลิตพลัมหมาด

- สารประกอบซัลไฟต์ (Sulfite compound) (อุดมเกียรติ และ รัชนี้, 2532)

สารประกอบในกลุ่มซัลไฟด์ที่นิยมใช้กันมาก ได้แก่ ซัลเฟอร์ไดออกไซด์โซเดียมซัลไฟด์ โปตัสเซียมซัลไฟด์โซเดียมเมตาไบซัลไฟด์และ โปตัสเซียมเมตาไบซัลไฟด์เป็นต้น ซึ่งสารเหล่านี้ถูกนำมาใช้ในการป้องกันการเกิดปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลทั้งที่เกี่ยวข้องและไม่เกี่ยวข้องกับเอนไซม์ โดยมีวัตถุประสงค์ของการใช้สารประกอบซัลไฟด์

-ป้องกันการเสื่อมเสียของอาหารเพื่อยืดอายุการเก็บรักษาและถนอมอาหารซึ่งสารประกอบซัลไฟด์ ที่อยู่ในรูปกรดซัลฟูรัสจะมีบทบาทในการยับยั้งการเจริญเติบโตของยีสต์ รา และแบคทีเรีย โดยมีผลต่อผนังเซลล์และการทำงานของเอนไซม์ของจุลินทรีย์ ทำให้ไม่สามารถทำงานได้ตามปกติ และพบว่าเมื่อค่าความเป็นกรด-ด่างลดลง ประสิทธิภาพในการยับยั้งจุลินทรีย์จะมีค่าเพิ่มขึ้น

- ป้องกันการเกิดสีน้ำตาลสารประกอบซัลไฟด์สามารถควบคุมการเกิดสีน้ำตาลได้จากทั้งปฏิกิริยาที่เกี่ยวข้องและไม่เกี่ยวข้องกับเอนไซม์ เช่น การยับยั้งปฏิกิริยาที่เกี่ยวข้องกับเอนไซม์ (enzymatic browning reaction) โดยสารประกอบซัลไฟด์จะมีส่วนช่วยในการยับยั้งการเกิดสีน้ำตาลได้โดย ทำปฏิกิริยากับพันธะไดซัลไฟด์ที่อยู่ในเอนไซม์ ซึ่งทำให้โครงสร้างของเอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดสเปลี่ยนแปลงไปส่งผลการทำงานของเอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดสและนอกจากนี้ยังทำปฏิกิริยากับออร์โทควิโนน(o-quinone)เกิดเป็น Sulphoquinones ซึ่งไม่สามารถทำปฏิกิริยากับเอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดสได้

- ยับยั้งปฏิกิริยาที่ไม่เกี่ยวข้องกับเอนไซม์ (non- enzymatic browning reaction) โดยสารประกอบซัลไฟด์จะป้องกันการรวมทำปฏิกิริยาระหว่างหมู่อะมิโนและน้ำตาลรีดิวซ์ โดยสารประกอบซัลไฟด์ทำให้โปรตีนแตกตัวเป็น thiol และ thiosulfonate protein และทำปฏิกิริยากับน้ำตาลรีดิวซ์ ตรงหมู่คาร์บอนิลได้สาร hydroxysulfonate ซึ่งไม่สามารถเกิดพอลิเมอร์ไรซ์ไปเป็นสารที่มีสีน้ำตาลได้

- ป้องกันการหืนในกระบวนการแปรรูปอาหารโดยที่ซัลเฟอร์ไดออกไซด์และเกลือซัลไฟด์ที่ละลายน้ำจะอยู่ในรูปของกรดซัลฟูรัสซึ่งจะยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ในพืชผักผลไม้ระหว่างการแปรรูปและยังช่วยต่อต้านการออกซิไดส์หรือกันหืนในกระบวนการทำแห้งผลไม้

■ ปัจจัยที่มีผลต่อปริมาณซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในอาหาร

- ชนิดของอาหารและปริมาณของสารประกอบซัลไฟด์ที่เติมลงไปอาหารที่มีองค์ประกอบของสารตั้งต้นในการเกิดปฏิกิริยามาก เช่น อาหารที่มีปริมาณน้ำตาล หรือโปรตีน เมื่อทำปฏิกิริยากับสารประกอบซัลไฟด์ จะได้ซัลโฟเนตซึ่งมีความคงตัว นอกจากนี้อาหารที่มีก๊าซออกซิเจนแทรกอยู่หรือบรรจุในภาชนะที่อากาศสามารถแทรกผ่านได้ มีผลทำให้สารประกอบซัลไฟด์ถูกออกซิไดซ์เป็นซัลเฟตซึ่งมีความคงตัว และการใช้สารประกอบซัลไฟด์ในปริมาณมาก ส่งผลให้มีปริมาณประกอบซัลไฟด์ซึ่งอยู่ในรูปซัลไฟด์อิสระจำนวนมากตกค้างอยู่ในอาหาร ซึ่งสารชนิดนี้เป็นตัวกำหนดปริมาณซัลเฟอร์ไดออกไซด์ทั้งหมดที่มีอยู่ในอาหาร

- กรรมวิธีการผลิต อาหารที่ผ่านขั้นตอนการผลิตหลายขั้นตอน หรือใช้อุณหภูมิในการผลิตสูง ปริมาณซัลเฟอร์ไดออกไซด์ตกค้างมีค่าลดลงตามไปด้วย เนื่องจากความร้อนมีผลทำให้ซัลไฟด์บางส่วน สลายตัวเป็นก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ หรือถูกออกซิไดซ์เป็นซัลเฟต และบางส่วนทำปฏิกิริยากับสารอาหาร
- ระยะเวลาและอุณหภูมิในระหว่างการเก็บรักษา เมื่อระยะเวลาในการเก็บรักษาเพิ่มขึ้น หรือ เก็บรักษาในสภาวะที่อาหารสัมผัสกับออกซิเจน หรือ เก็บรักษาที่อุณหภูมิสูง จะส่งผลให้สารประกอบซัลไฟด์ สลายไปอยู่ในรูปของซัลเฟอร์ไดออกไซด์ หรือถูกออกซิไดซ์เป็นซัลเฟตส่งผลให้มีปริมาณซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ตกค้างในอาหารลดลงแม้ว่าสารประกอบซัลไฟด์จะมีความสามารถในการยับยั้งจุลินทรีย์ และปฏิกิริยาการ เกิดสีน้ำตาลที่เกี่ยวข้องและไม่เกี่ยวข้องกับเอนไซม์ แต่ยังมีข้อจำกัดในการใช้ เนื่องจากเป็นสารก่อภูมิแพ้ (food allergen) ปัจจุบันจึงได้มีการกำหนดเกณฑ์การใช้และปริมาณซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ตกค้างใน ผลิตภัณฑ์ ซึ่งสำหรับเนื้อปลาลบอบแห้งกำหนดให้มีปริมาณซัลเฟอร์ไดออกไซด์ตกค้างไม่เกิน 1,500 ppm (สำนักงานคณะกรรมการอาหารและยา, 2547)

2.3 การออกแบบวิธีการพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Design)

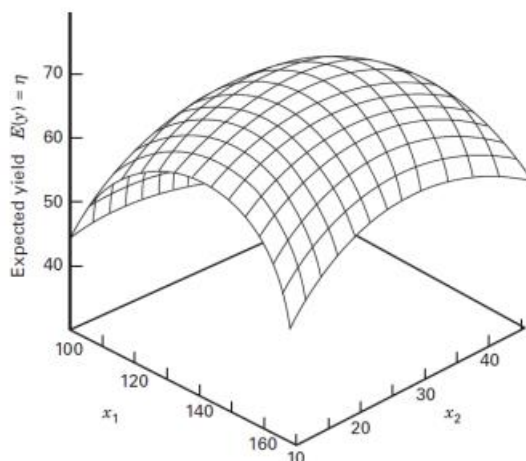
วิธีการพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology: RSM) คือ วิธีทางคณิตศาสตร์และสถิติ เทคนิคที่มีประโยชน์สำหรับการสร้างแบบจำลองและการวิเคราะห์ปัญหาที่ตอบสนองความสนใจได้รับอิทธิพลจาก ตัวแปรหลายตัวและมีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการตอบสนองนี้ ตัวอย่างเช่น สมมติว่าวิศวกรอุตสาหการ ต้องการหาอุณหภูมิ (x_1) ความเร็วลม (x_2) และความเข้มข้นของสารป้องกันการเกิดสีน้ำตาล (x_3) ต่อสภาวะที่ รักษาคุณภาพที่ดีที่สุด (y) ของกระบวนการผลิต สามารถเขียนเป็นฟังก์ชันกระบวนการของระดับของความเร็ว รอบและอัตราป้อน ได้ดังสมการที่ 2.1

$$y = f(X_1 - X_2) + \varepsilon \quad (2.1)$$

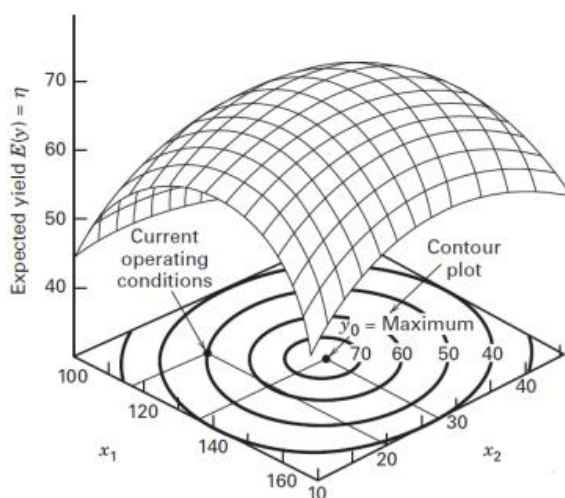
โดย ε คือ ค่าความผิดพลาดหรือข้อผิดพลาดที่สังเกตได้ในการตอบสนอง y ถ้าแสดงถึงความ คาดหวังการ ตอบสนองโดย $E(y) = f(X_1 - X_2) = \eta$ สามารถเขียนสมการของพื้นผิว ได้ดังสมการ ที่ 2.2

$$\eta = f(X_1 + X_2) \quad (2.2)$$

ซึ่งจะเรียกว่า พื้นผิวการตอบสนองแบบกราฟิก ดังภาพ 2.2 โดยที่ η จะถูกพล็อตกับระดับ ของ X_1 และ X_2 เพื่อช่วยให้เห็นภาพรูปร่างของพื้นผิวดตอบสนองเรามักจะวางแผนรูปทรงของพื้นผิว ตอบสนองดังแสดงในภาพ 2.3 ในพล็อตรูปร่างเส้นของการตอบสนองคงที่จะถูกวาดในระนาบ X_1 และ X_2 แต่ละเส้นตรงกับความสูงของพื้นผิวดตอบสนองโดยเฉพาะ เราเคยเห็นประโยชน์ของโครงร่าง (Contour Plot)



ภาพ 2.2 พื้นทีตอบสนองแบบกราฟิก



ภาพ 2.3 พื้นทีตอบสนองแบบสามมิติ

ที่มา: Montgomery (2012)

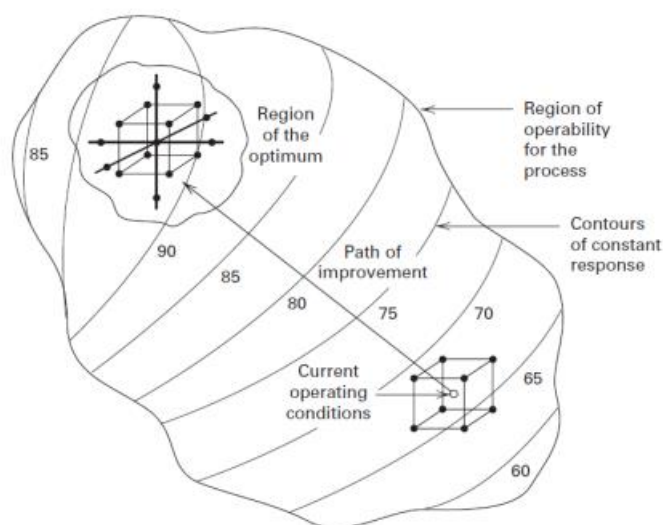
ในปัญหา RSM ส่วนใหญ่ไม่รู้จักรูปแบบของความสัมพันธ์ระหว่างการตอบสนองและตัวแปร อิสระ ดังนั้นขั้นตอนแรกใน RSM คือการหาการประมาณที่เหมาะสมสำหรับความสัมพันธ์การทำงานที่ แท้จริงระหว่าง y และชุดของตัวแปรอิสระ โดยปกติแล้วจะใช้พหุนามต่ำในบางภูมิภาคของตัวแปร อิสระ หากการตอบสนองถูกสร้างแบบจำลองอย่างดีโดยฟังก์ชันเชิงเส้นของตัวแปรอิสระฟังก์ชันการ ประมาณนั้นเป็น “ first-order model” ดังสมการที่ 2.3

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k + \varepsilon \quad (2.3)$$

ถ้ามีส่วนโค้งเกี่ยวข้องกับระบบ จะใช้ฟังก์ชันพหุนามที่มีระดับสูง เช่น second-order model ดัง สมการที่ 2.4

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i < j} \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (2.4)$$

การวิเคราะห์พื้นผิวตอบสนองผลตอบ เป็นขั้นตอนต่อเนื่อง บ่อยครั้งที่เราอยู่ที่จุดบนพื้นผิว ตอบสนองที่อยู่ห่างไกลจากที่เหมาะสมเช่น การทำงานในสภาพปัจจุบัน (ภาพที่ 2.11) มีความโค้ง เล็กน้อยในระบบและโมเดลลำดับที่หนึ่งจะเหมาะสม วัตถุประสงค์ของเราคือนำผู้ทดสอบไปอย่าง รวดเร็วและมีประสิทธิภาพตามเส้นทางของการปรับปรุงไปสู่บริเวณโดยรอบที่เหมาะสมที่สุด เมื่อพบ ค่าที่เหมาะสมที่สุดแล้วอาจมีการใช้แบบจำลองที่ซับซ้อนมากขึ้นเช่นโมเดลลำดับที่สองและการ วิเคราะห์อาจดำเนินการเพื่อหาตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุด จากภาพ 2.4 เราจะเห็นว่าการวิเคราะห์ พื้นผิวตอบสนองนั้นคิดว่าเป็น “ การปีนเขา ” ซึ่งจุดสูงสุดของเนินเขาแสดงถึงจุดตอบสนองสูงสุด ถ้า สิ่งที่เหมาะสมที่สุดคือการตอบสนองขั้นต่ำเราอาจคิดว่า “ ลงไปสู่หุบเขา ” จุดประสงค์สุดท้ายของการวิเคราะห์พื้นผิวผลตอบก็คือการหาเงื่อนไขในการทำงานที่ดีที่สุด สำหรับระบบหรือเพื่อที่จะหาอาณาเขตของปัจจัยที่จะก่อให้เกิดการทำงานที่น่าพอใจที่สุด



ภาพ 2.4 วิธีการอย่างมีลำดับขั้นตอนของการของการวิเคราะห์พื้นผิวตอบ

ที่มา: Montgomery (2012)

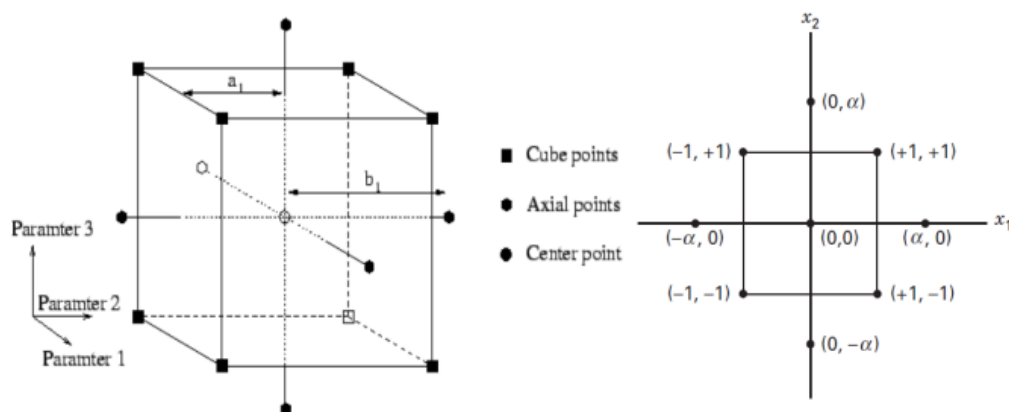
2.3.1 การออกแบบส่วนประสมกลาง (Central Composite Design: CCD)

การออกแบบการทดลองแบบ Central Composite Design of Experiment: CCD เป็น การทดลอง ตั้งแต่ 3 ปัจจัยถึง 10 ปัจจัย ด้วยระดับการทดลอง 3-5 ระดับ(แทนด้วยสัญลักษณ์ 1, 0, +1) กล่าวคือ จะปรับตัวแปรที่ต้องการศึกษาไปตัวแปรละ 3 ค่า แต่จะมีการปรับตัวแปรแบบ Full Combination หรือ Full Factorial โดยจะเลือกเพียงบาง Runs หรือบางสภาวะการทดลองที่ จำเป็น เพื่อให้ได้ข้อมูลเพียงพอต่อการสร้างแบบจำลองทางสถิติโดย Model ที่ได้จะยังคงมี Main Effect, Interaction และ Quadratic Terms โดยใช้ทรัพยากรไม่มากนักเกินไป Central Composite Design เป็นการออกแบบการทดลอง (Design Of Experiments: DOE) ที่ประกอบไปด้วย 3 ส่วน คือ

2.7.1.1 Factorial Points ซึ่งจะเป็นการนำเอา Full Factorial มาเป็นส่วนหนึ่งของ การทดลอง

2.7.1.2 Axial Points เป็นการปรับค่าตัวแปรใดตัวแปรหนึ่งในขณะที่ Fix ให้ค่าตัวแปร อื่นอยู่ที่ค่ากลาง หรือค่า 0 และ

2.7.1.3 Center Points เป็นการปรับค่าตัวแปรทุกตัวแปรที่ค่ากลาง หรือค่า 0 โดยปกติแล้ว ค่าที่ Center Points ควรจะใช้จำนวนการทดลอง 3-6 การทดลอง สำหรับตารางที่ 2.2 เลือกใช้ค่า Alpha = 1 หรือ ระยะจาก Axial Points ไปยัง Center Points เป็น 1 (บางครั้งเรียก design ที่ alpha = 1 แบบนี้ว่า face centered design) ดังภาพ 2.5



ภาพ 2.5 การออกแบบส่วนประสมกลาง Central Composite Design สำหรับ k=2 และ k=3

ที่มา: Montgomery (2012)

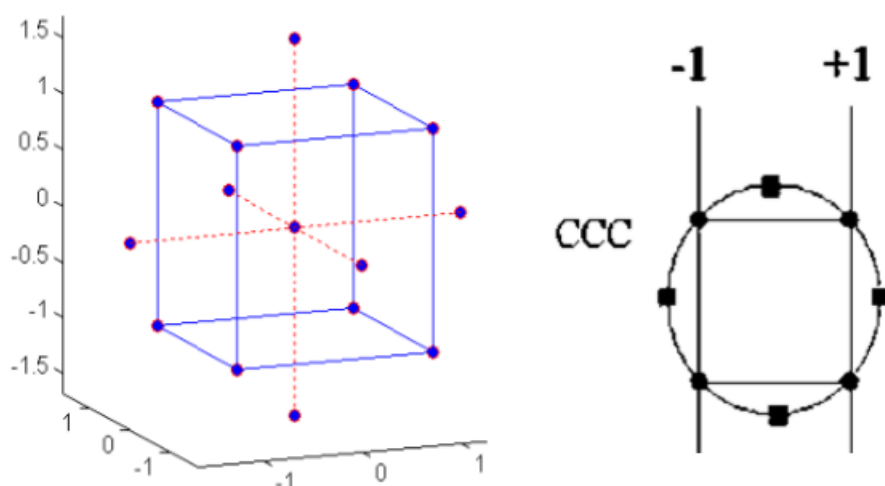
ตารางที่ 2.2 ลักษณะการเก็บข้อมูลของ Central Composite Design สำหรับ 3 Factors

A	B	C	Point Types
-1	-1	-1	Factorial Point
1	-1	-1	Factorial Point
-1	1	-1	Factorial Point
1	1	-1	Factorial Point
-1	-1	1	Factorial Point
1	-1	1	Factorial Point
-1	1	1	Factorial Point
1	1	1	Factorial Point
-1	0	0	Axial Point
1	0	0	Axial Point
0	-1	0	Axial Point
0	1	0	Axial Point
0	0	-1	Axial Point
0	0	1	Axial Point
0	0	0	Center Point
0	0	0	Center Point

2.3.2 รูปแบบ Central Composite Design

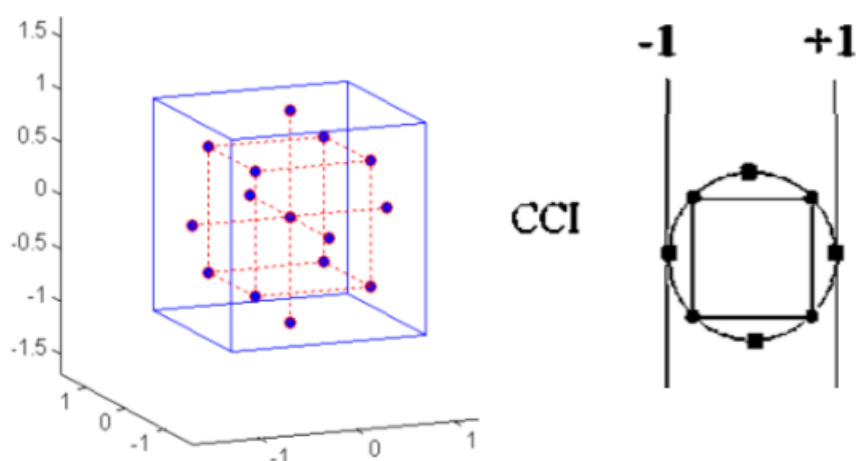
การออกแบบการทดลองด้วยวิธีการ Central Composite Design สามารถออกแบบ การทดลองได้ 3 ลักษณะ ดังนี้

2.3.2.1 การออกแบบ Central Composite Design แบบ Circumscribed: CCC เป็นการออกแบบคอมโพสิตกลางดั้งเดิมและทำการทดสอบที่ห้าระดับ จุดขอบ (จุดแบบแยกส่วนหรือ แบบแยกส่วน) อยู่ที่ยึด จำกัด การออกแบบ จุดดาวอยู่ที่ระยะห่างจากศูนย์กลางขึ้นอยู่กับจำนวนของ ปัจจัยในการออกแบบ จุดดาวขยายช่วงนอก การตั้งค่าต่ำและสูงสำหรับทุกปัจจัย จุดกึ่งกลางทำให้การ ออกแบบเสร็จสมบูรณ์ ภาพ 2.6 แสดงการออกแบบ CCC การกรอกแฟกทอเรียลหรือความ ละเอียดที่มีอยู่การออกแบบแฟกทอเรียลแบบเศษส่วนด้วยจุดของดาวและ จุดศูนย์กลางออกแบบ



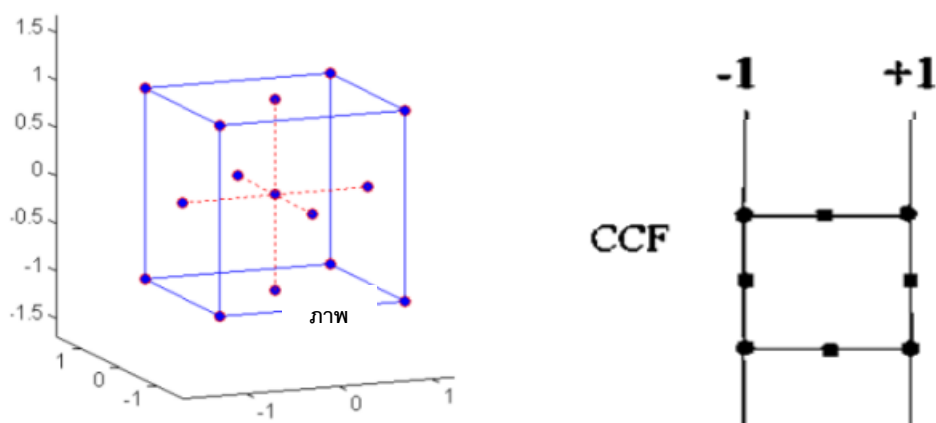
ภาพ 2.6 การออกแบบ Central composite circumscribed

2.3.2.2 การออกแบบ Central Composite Design แบบ Inscribed: CCI ใน CCI จุด จะถูกกำหนดที่ข้อจำกัด การออกแบบมีขีดจำกัดและจุดขอบอยู่ในช่วงแสดงในภาพ 2.7 ในทางหนึ่ง การออกแบบ CCI เป็นการออกแบบ CCC แบบลดขนาด นอกจากนี้ยังให้ผลลัพธ์ในห้าระดับสำหรับแต่ละปัจจัย การออกแบบ CCI ใช้เฉพาะจุดภายในช่วงปัจจัยที่ระบุไว้ ดังนั้นพื้นที่การคาดการณ์จะถูก จำกัด เมื่อเปรียบเทียบกับ Central composite circumscribed



ภาพ 2.7 การออกแบบ Central composite inscribed

2.3.2.3 การออกแบบ Central Composite Design แบบ Face Centered: CCF ในการออกแบบนี้จุดดาวอยู่ที่กึ่งกลางของแต่ละหน้าของพื้นที่แฟคทอเรียล ดังนั้น $\alpha = \pm 1$ และใช้เพียง สามระดับเท่านั้น แสดงดังภาพ 2.8 การประกอบแฟกทอเรียลหรือการออกแบบความละเอียดเพิ่ม อยู่กับจุดที่เหมาะสม สามารถสร้างการออกแบบนี้ได้ การออกแบบ CCF ให้การคาดการณ์ที่มีคุณภาพ ค่อนข้างสูงในทุกช่วงการออกแบบ แต่ความแม่นยำต่ำสำหรับการประมาณค่าสัมประสิทธิ์กำลังสอง



ภาพ 2.8 การออกแบบ Central composite face centered

2.4 วิธีการหาคำตอบ และสถานะที่เหมาะสม

ปัจจุบันปัญหาการตัดสินใจมีความยากและซับซ้อนมากขึ้น การประยุกต์วิทยาการทางด้าน เทคโนโลยีคอมพิวเตอร์เพื่อใช้ในการประมวลผลโดยอาศัยหลักการทางคณิตศาสตร์จึงมีความจำ เป็นมากขึ้น ขั้นตอนวิธีการคอมพิวเตอร์หรือเราเรียกว่าอัลกอริทึมที่จะต้องเรียนรู้ถึงบริบทปัญหาก่อน เพื่อกำหนดรูปแบบขั้นตอนของ อัลกอริทึมที่มีประสิทธิภาพในการหาคำตอบที่ดีที่สุดของปัญหา (Solution Approach) อย่างเช่น การพิจารณา การตัดสินใจในการลงทุนภาคเอกชนและการส่งเสริม จากหน่วยงานรัฐบาล ถ้าในบางกรณีการแก้ปัญหาด้วยวิธี ทางคณิตศาสตร์ ไม่สามารถแก้ปัญหาได้ วิธี การฮิวริสติกและเมตาฮิวริสติกจะถูกนำมาช่วยในการแก้ปัญหา ดังกล่าว

2.4.1 วิธีฮิวริสติก (Heuristic Method)

วิธีฮิวริสติกเป็นวิธีการแก้ปัญหาที่คิดค้นขึ้นมาเพื่อใช้ในการหาผลเฉลยจากการแก้ปัญหา ใดปัญหาหนึ่ง โดยเฉพาะ ซึ่งไม่มีแบบแผนที่ตายตัว โดยมักต้องอาศัยความเข้าใจและประสบการณ์ใน การแก้ไขปัญหาหนึ่งๆเป็น อย่างดี ดังนั้นวิธีฮิวริสติกที่ใช้ในการแก้ปัญหาหนึ่ง อาจไม่สามารถนำไปใช้ แก้ปัญหาอีกปัญหาหนึ่งได้ และไม่สามารถรับประกันได้ว่าจะได้คำตอบที่ดีที่สุด หรือคำตอบที่เท่ากัน ทุกครั้ง แต่อย่างไรก็ตาม วิธีฮิวริสติกได้ถูก นำมาใช้ในการหาคำตอบเนื่องจากมีความเหมาะสมดังนี้

(1) ง่ายในการทำความเข้าใจและง่ายในการนำไปใช้งานและการอธิบายถึงลักษณะการ แก้ปัญหาและ ผลลัพธ์ที่ได้

(2) ระบบจริง (Real practice) มีความซับซ้อนมากจนกระทั่งไม่สามารถเขียนในรูป แบบจำลองทาง คณิตศาสตร์เพื่อหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดได้ หรืออาจจะเป็นปัญหาที่ใช้เวลาในการ คำนวณมากเกินไป

(3) เป็นปัญหาที่ซับซ้อนไม่คุ้มค่ากับการใช้วิธีหาคำตอบแบบแม่นยำตรง (Exact method)

(4) ประหยัดเวลาในการสร้างตัวแบบ (Model) รวมทั้งการเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เพื่อหาคำคำตอบ อย่างไม่จำกัด สำหรับบางปัญหาก็อาจจะไม่มีความจำเป็นต้องใช้คอมพิวเตอร์เข้ามา ช่วย หากปัญหานั้นมีวิธีฮิวริ สติกที่ไม่ซับซ้อนและต้องการทำการตัดสินใจอย่างรวดเร็ว

วิธีฮิวริสติกสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท ตามลักษณะของวิธีในการสร้างคำตอบ ได้แก่

(1) วิธีการสร้างผลเฉลย (Constructive method) วิธีนี้อาศัยข้อมูลของปัญหาในการ สร้างขั้นตอน วิธีการหาผลเฉลย ตัวอย่างของวิธีการนี้ที่ได้รับความนิยมและได้รับการยอมรับว่ามี ประสิทธิภาพได้แก่วิธี (Greedy Randomized Adaptive Search Procedure; GRASP) โดย ฮิวริสติกนี้ประกอบไปด้วย 2 ระยะคือ ระยะการสร้างคำตอบเริ่มต้น(Initial solution - development) และระยะการปรับปรุงคำตอบ (Solution improvement) ซึ่งอาจจะใช้วิธีการต่าง ๆ เช่น การแลกเปลี่ยนตำแหน่ง (Swap operator) และการเคลื่อนย้าย ตำแหน่ง (Move exchange) การค้นหาเฉพาะที่ (Local search) หรือวิธีการ Saving หรือการแทรก (Saving or Insertion)

(2) วิธีฮิวริสติกแบบค้นหาคำตอบใกล้เคียง (Neighborhood search heuristic) เป็นวิธี สร้างคำตอบขึ้นมาคำตอบหนึ่ง ที่ไม่ขัดแย้งกับเงื่อนไขแล้วนำคำตอบนั้นมาทำการสลับตำแหน่งไปเรื่อยๆ เพื่อหาคำตอบที่ดีกว่าคำตอบเดิม ตามรอบที่กำหนดที่ได้ออกแบบไว้ โดยตัวอย่างของ วิธีฮิวริสติกที่นิยมใช้ในงานวิจัยโลจิสติกส์ เช่น วิธี Matching base, Nearest insertion, Nearest neighbor และวิธีค้นหาเฉพาะที่ (Local search)

2.4.2 วิธีเมตาฮิวริสติก (Meta-Heuristic Method)

วิธีเมตาฮิวริสติก เป็นวิธีที่ได้จากการพัฒนาและดัดแปลงวิธีฮิวริสติกให้มีความยืดหยุ่นใน การหาผลเฉลยของปัญหาที่มีความซับซ้อนและมีตัวแปรตัดสินใจจำนวนมากได้อย่างรวดเร็วและมี ประสิทธิภาพ ถึงแม้ผลเฉลยที่ได้ อาจไม่ใช่ผลเฉลยที่ให้ค่าเหมาะสมที่สุด หรือไม่สามารถรับประกัน คุณภาพผลเฉลยให้ดีที่สุดครั้งที่ทำการประมวลผล แต่อย่างไรก็ตามผลเฉลยที่ได้จะเป็นที่ยอมรับและ สามารถค้นหาได้ภายในระยะเวลาอันเหมาะสมโดย

Blum และ Roli (2003) ได้สรุปหลักการ เบื้องต้นและประเภทของเมตาฮิวริสติกไว้ดังนี้ 1) เมตาฮิวริสติกมีระเบียบวิธีในการค้นหาคำตอบที่ดี ภายในพื้นที่ของคำตอบที่เป็นไปได้ (Feasible Region) 2) เมตาฮิวริสติกมีจุดประสงค์เพื่อหาคำตอบที่ ดีที่สุดหรือคำตอบที่ใกล้เคียงคำตอบที่ดีที่สุดในระยะเวลาอันสั้น 3) วิธีการทางเมตาฮิวริสติก อาจจะมีทั้งแบบง่ายไม่ซับซ้อน เช่น การค้นหาเฉพาะที่ (Local search) หรือแบบที่ยุ่งยากซับซ้อนมากกว่า เช่น วิธีระบบมด (Ant System) วิธีเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm) วิธีการค้นหา ต้องห้าม (Tabu Search) วิธีเลียนแบบการอบอ่อน (Simulated Annealing) เป็นต้น 4) เมตา ฮิวริสติกเป็นขั้นตอนการประมาณคำตอบ 5) เมตาฮิวริสติก อาจะเกิดจากการรวมหลากหลายเทคนิค เพื่อค้นหาคำตอบที่ดีที่สุดในพื้นที่คำตอบที่เป็นไปได้ 6) เมตาฮิวริสติกมีระเบียบขั้นตอนมาตรฐาน ที่แน่นอน แม้ว่าเมื่อนำไปประยุกต์ใช้ในปัญหาที่แตกต่างกันจะมีรายละเอียดของขั้นตอนย่อยที่แตกต่างกัน แต่ฮิวริสติกสำหรับปัญหาแต่ละปัญหาต้องดำเนินการตามขั้นตอนหลักของเมตาฮิวริสติกดั้งเดิม เช่น การประยุกต์ใช้วิธีระบบมด (Ant System) ในปัญหาที่แตกต่างกัน จะมีระเบียบหลักๆที่เหมือนกัน เช่น การมีทัศนคติ (Bias) ก่อนตัดสินใจ หลังจากตัดสินใจต้องใช้คำตอบมาเพิ่มหรือลดปริมาณทัศนคติ นั้น วิธีการตัดสินใจจากการใช้ระดับทัศนคติในแต่ละปัญหาอาจจะไม่เหมือนกัน และวิธีการเลือก 25 คำตอบมาเพิ่มหรือลดระดับทัศนคติในแต่ละปัญหาอาจจะแตกต่างกัน เป็นต้น 7) เมตาฮิวริสติกต้อง สามารถใช้ได้กับปัญหาที่หลากหลาย 8) เมตาฮิวริสติกอาจจะมีลักษณะเป็นคำบรรยายโดยย่อก็ได้ หรือไม่จำเป็นต้องมีหลักการทางคณิตศาสตร์ 9) ปัจจุบันนี้ เมตาฮิวริสติกใช้ความจำชั่วคราวมากขึ้นใน การจำคำตอบเดิม เพื่อค้นหาคำตอบที่ไม่ซ้ำเดิมหรือแตกต่างไปจากเดิม เช่น วิธีการค้นหาต้องห้าม วิธีระบบมด

ในปัจจุบัน วิธีการเมตาฮิวริสติกมีอยู่หลากหลายให้เลือกใช้ แต่ละวิธีจะมีจุดดีและจุดด้อย ที่แตกต่างกัน บางวิธีการให้ผลลัพธ์ดีแต่ใช้เวลาในการคำนวณนาน บางวิธีการคำนวณรวดเร็วแต่ให้ ผลลัพธ์แย่กว่าวิธีอื่น การแบ่งวิธีการเมตาฮิวริสติกมีหลายวิธี Blum และ Roli (2003) ได้เสนอ วิธีการแบ่งไว้ดังนี้ 1) แบบที่เกิดจากแรงบันดาลใจจากธรรมชาติหรือแบบไม่ได้เกิดจากแรงบันดาลใจ จากธรรมชาติ วิธีที่เกิดจากแรงบันดาลใจจาก

ธรรมชาติ ได้แก่ วิธีระบบมด (Ant System) วิธีการเชิง พันธุกรรม (Genetic Algorithm) วิธีการลอกแบบ (Menetic Algorithm) วิธีการเลียนแบบการอบ อ่อน (Simulated Annealing) ส่วนวิธีการที่ไม่ได้เลียนแบบธรรมชาติ เช่น วิธีการค้นหาต้องห้าม (Tabu Search) การค้นหาคำตอบเฉพาะที่แบบวนซ้ำ (Iterated Local Search) วิธีการค้นหาจาก คำตอบใกล้เคียงแบบมีเงื่อนไข (Variable Neighborhood Search) เป็นต้น 2) แบบใช้ประชากรหรือ แบบไม่ใช้ประชากร (Population on non-Population Based) แบบใช้ประชากรคือในหนึ่งรอบของการคำนวณจะมีคำตอบมากกว่าหนึ่งคำตอบให้เลือก ส่วนแบบไม่มีประชากร ในหนึ่งรอบของการคำนวณจะมีคำตอบเพียงคำตอบเดียว วิธีแบบใช้ประชากร เช่น วิธีระบบมด วิธีเชิงพันธุกรรม วิธีการ ลอกแบบ วิธีแบบไม่ใช้ประชากร เช่น วิธีการเลียนแบบการอบอ่อน วิธีการค้นหาต้องห้าม วิธีการ ค้นหาคำตอบใกล้เคียงแบบมีเงื่อนไข 3) แบบสมการเป้าหมายคงที่หรือไม่คงที่ (Dynamics or Static Objective Function) ในหนึ่งรอบของการคำนวณอาจจะมีการเปลี่ยนแปลงสมการเป้าหมาย เพื่อให้ ได้คำตอบใหม่ๆเกิดขึ้นหรือไม่มีการเปลี่ยนแปลงสมการเป้าหมาย ในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงสมการ เป้าหมาย เช่น การค้นหาคำตอบเฉพาะที่แบบมีการชี้นำ (Guided Local Search) กรณีที่ไม่มีการ เปลี่ยนแปลงสมการเป้าหมาย เช่น วิธีระบบมด วิธีการเชิงพันธุกรรม วิธีการลอกแบบ วิธีเลียนแบบ การอบอ่อน วิธีการค้นหาต้องห้าม วิธีการค้นหาคำตอบเฉพาะที่แบบวนรอบซ้ำ วิธีการค้นหาจาก คำตอบใกล้เคียงแบบมีเงื่อนไข 4) แบบเปลี่ยนวิธีการหาคำตอบใกล้เคียงคำตอบปัจจุบัน (Neighborhood) คงที่และไม่คงที่ กรณีที่วิธีการหาคำตอบใกล้เคียงคงที่ ได้แก่ วิธีระบบมด วิธีการเชิง พันธุกรรม วิธีการลอกแบบ วิธีเลียนแบบการอบอ่อน วิธีการค้นหาต้องห้าม วิธีการค้นหาคำตอบ เฉพาะที่แบบวนรอบซ้ำ ส่วนกรณีที่มีการเปลี่ยนวิธีการหาคำตอบที่ใกล้เคียง ได้แก่วิธีการค้นหาจาก คำตอบใกล้เคียงแบบมีเงื่อนไข 5) แบบมีและไม่มีหน่วยความจำ ถ้ามีการใช้หน่วยความจำ จะจำว่ามี คำตอบใดบ้างที่ผ่านมาแล้วนำมาเพื่อเป็นข้อมูลในการหาคำตอบรอบถัดไป ซึ่งกรณีที่ใช้หน่วยความจำ ที่ปรากฏชัด ได้แก่ วิธีระบบมด วิธีการค้นหาต้องห้ามส่วนวิธีที่ไม่ใช้หน่วยความจำ เช่น วิธีการค้นหาคำตอบเฉพาะที่แบบวนรอบซ้ำ

นอกจากนี้ยังมีวิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดของหลักการทำงานของกลุ่มประชากรในการ แก้ปัญหามานานวิจัยในสาขาวิชาต่าง ๆ ที่ถูกสร้างขึ้นในรูปแบบวิธีการแก้ปัญหาด้วยวิธีการเลียนแบบ ธรรมชาติและการวิวัฒนาการ โดยใช้ผลต่าง (Differential evolution algorithm: DE) โดยผลงานวิจัย วิธีการเหล่านี้ เริ่มได้รับความสนใจมากขึ้นจนถึงปัจจุบัน

2.5 การแก้ปัญหาด้วยวิธีการวิวัฒนาการโดยใช้ผลต่าง (Differential Evolution algorithm: DE)

ขั้นตอนและหลักการในการค้นหาคำตอบด้วยวิธีDifferential Evolution (DE) ที่เสนอโดย Storn and Price (1997) ซึ่งได้อธิบายว่า กรอบทฤษฎีของวิธีการเป็นรูปแบบง่าย ๆ และ มีระยะเวลา ในการคำนวณที่น้อย ไม่สิ้นเปลืองพื้นที่เก็บข้อมูลในเครื่องคอมพิวเตอร์ ได้สรุปว่า การวิวัฒนาการของ DE ถูกประยุกต์ใช้อย่างแพร่หลายและมีการแสดงจุดแข็งในหลายพื้นที่ ที่มีการประยุกต์ใช้

ในวิธีการค้นหาที่ยึดตามหลักประชากร การวิวัฒนาการจะเริ่มสุ่มประชากรเริ่มต้นในขนาด N ของเวกเตอร์มิติ D การแก้ไขปัญหาการวิวัฒนาการอัลกอริทึมจะไปแทนที่มิติของเวกเตอร์ D ซึ่งค่าของตัวแปรแต่ละตัวในพื้นที่ของมิติจะถูกแสดงเป็นเลขในระบบจำนวนจริง ลักษณะที่เด่นชัดของ กระบวนการ คือ กลไกใหม่สำหรับการสร้างเวกเตอร์ของการทดลองการวิวัฒนาการ จะสร้าง เวกเตอร์การทดลองโดยการเปลี่ยนแปลงและมองข้ามหลักการดำเนินงาน จากนั้นทดแทนการ ดำเนินงานเฉพาะรายบุคคลที่เราเรียกว่า การดำเนินการคัดเลือก ที่เกิดขึ้นเมื่อเวกเตอร์การทดลองนี้มี ประสิทธิภาพมากกว่าเวกเตอร์ที่สอดคล้องกัน กระบวนการเหล่านี้จะถูกดำเนินการอีกครั้งจนกว่าจะมี เกณฑ์ที่ยังให้มีการหยุด ทั้งนี้การวิวัฒนาการของประชากรก็就会被ดำเนินการโดยผ่านวิธีการทำซ้ำ ของ 3 ผู้ประกอบการหลักซึ่งก็คือ การกลายพันธุ์ขั้นตอนทางพันธุกรรมแบบโครอสโอเวอร์ และการคัดเลือกด้วย กระบวนการทำงานในการวิวัฒนาการแบบคลาสสิกโดย Price และคณะ (2005) ได้สรุปการแบ่งลำดับขั้นตอนที่สำคัญของการวิวัฒนาการแบบคลาสสิกไว้ดังนี้

2.5.1 Initial population

คือขั้นตอนการสุ่มเลือกจำนวนประชากรตั้งต้นภายใต้ขอบเขต ข้อจำกัด จำนวนหนึ่งซึ่ง สามารถกำหนดได้ หรือค่า NP: Number of population เป็น ตัวแปรตัดสินใจ เพื่อนำมาคำนวณหา ค่าคำตอบ Cost Value Fitness Value หรือ Function Value ในความหมายเดียวกัน

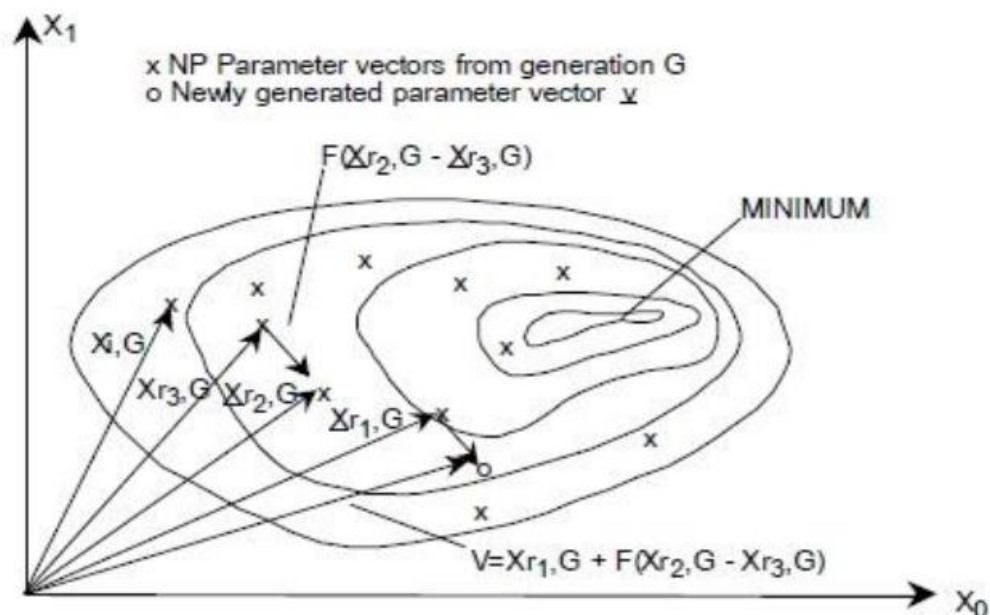
2.5.2 Mutation

คือ ขั้นตอนการคูณตัวแปรตัดสินใจด้วยปัจจัยตัวคูณ เรียกว่า Weighting Factor: F หรือ เรียกว่า Mutation Factor: F อีกชื่อหนึ่งเช่นกันเพื่อจุดประสงค์ของการผ่าเหล่า กลายพันธุ์ ให้ได้ คำตอบใหม่ที่แปลกแตกต่างไปจากกลุ่มจำนวนประชากรในข้อแรก มีขั้นตอนย่อย ดังนี้

2.9.2.1 ทำการกำหนด Target Vector (X_i, G) โดยที่ $i = 1, 2, 3, \dots, NP$

2.9.2.2 สุ่มเลือกจำนวน 2 Vector ($X_{r2, G}, X_{r3, G}$) จากประชากรตั้งต้นที่ไม่ซ้ำกับ Target Vector

2.9.2.3 ทำการคำนวณหา Mutant Vector ($V_{i, G+1}$) จากความสัมพันธ์



ภาพ 2.9 การค้นหา Mutant Vector ของฟังก์ชัน 2 ตัวแปร

ที่มา: Storn and Price (1997)

ในการปรับเปลี่ยนค่าพิกัดนั้น สามารถทำได้โดยการสุ่มเวกเตอร์มา 3 เวกเตอร์ (ตัวแทน ผลลัพธ์) ได้แก่ $X_{r1,G}$ / $X_{r2,G}$ / $X_{r3,G}$ มาดำเนินการ โดยเวกเตอร์ที่ถูกปรับเปลี่ยนค่าพิกัดไปแล้ว จะถูก เรียกว่า “มิวแทนต์เวกเตอร์” โดยที่ค่ามิวแทนต์เวกเตอร์ ($V_{i,G}$) จะมีค่าเท่ากับ $X_{r1,G}$ รวมกับ ผลต่าง ของเวกเตอร์ $X_{r2,G}$ และ $X_{r3,G}$ คูณด้วย F โดยสามารถอธิบายการปรับค่าในพิกัดของเวกเตอร์ได้ ดัง สมการที่ 2.5 และตารางที่ 2.3

$$V_{i,G+1} = X_{r1,G} + F(X_{r2,G} - X_{r3,G}) \quad (2.5)$$

เมื่อ	$X_{r1,G}$	คือ Target Vector
	$V_{i,G+1}$	คือ Mutant Vector
	$X_{r2,G}, X_{r3,G}$	คือ Random Vector
	F	คือ Weighting Factor

ตารางที่ 2.3 กลยุทธ์การสร้าง Mutant vector

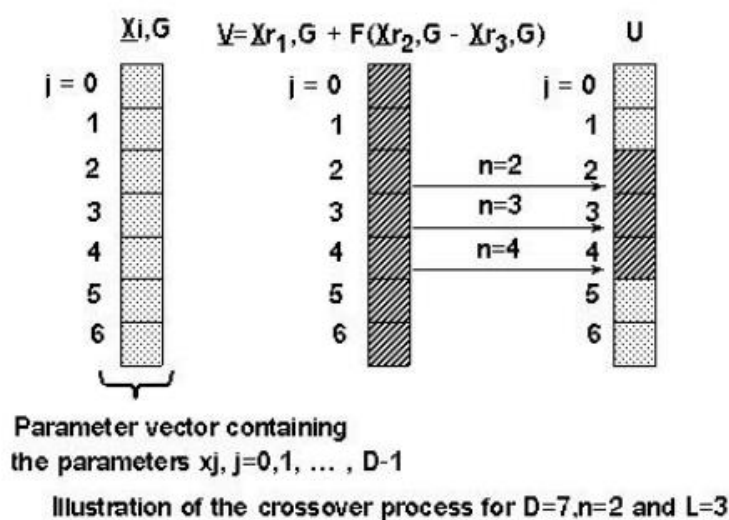
กลยุทธ์ที่	รูปแบบ	สมการการกลายพันธุ์ (Mutation)
Binomial		
1	DE/rand/1/bin	$V_{i,G+1} = X_{r1,G} + F(X_{r2,G} - X_{r3,G})$
2	DE/best/1/bin	$V_{i,G+1} = X_{best,G} + F(X_{r1,G} - X_{r2,G})$
3	DE/rand-to-best/1/bin	$V_{i,G+1} = X_{r1,G} + F1(X_{r2,G} - X_{r3,G}) + F2(X_{best,G} - X_{r1,G})$
4	DE/rand/2/bin	$V_{i,G+1} = X_{r1,G} + F(X_{r2,G} - X_{r3,G} + X_{r4,G} - X_{r5,G})$
5	DE/best/2/bin	$V_{i,G+1} = X_{best,G} + F(X_{r2,G} - X_{r3,G} + X_{r4,G} - X_{r5,G})$
Exponential		
6	DE/rand/1/exp	$V_{i,G+1} = X_{r1,G} + F(X_{r2,G} - X_{r3,G})$
7	DE/best/1/exp	$V_{i,G+1} = X_{best,G} + F(X_{r1,G} - X_{r2,G})$
8	DE/rand-to-best/1/exp	$V_{i,G+1} = X_{r1,G} + F1(X_{r2,G} - X_{r3,G}) + F2(X_{best,G} - X_{r1,G})$
9	DE/rand/2/exp	$V_{i,G+1} = X_{r1,G} + F(X_{r2,G} - X_{r3,G} + X_{r4,G} - X_{r5,G})$
10	DE/best/2/exp	$V_{i,G+1} = X_{best,G} + F(X_{r2,G} - X_{r3,G} + X_{r4,G} - X_{r5,G})$

2.5.3 Crossover หรือ Recombination

คือขั้นตอนการผสมสายพันธุ์ ซึ่งจะได้สายพันธุ์ใหม่ของคำตอบที่ดีกว่าและแยกว่าออกมา อย่างหลากหลาย เพื่อค้นหาสายพันธุ์จากตัวแปรตัดสินใจใหม่ ๆ โดยมีการสร้าง Trial Vector ($U_{i,G+1}$) ดังแสดงในสมการที่ 2.6 เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบและพิจารณาในการผสมสายพันธุ์ดังสมการ 2.6 ตัวอย่างการ Crossover สามารถแสดงได้ดังภาพ 2.10

$$U_{i,G+1} = \begin{cases} V_{i,j,G+1} & \text{if } \text{rand}_{i,j} \leq CR \text{ or } j = I_{rand} \\ X_{i,j,G} & \text{if } \text{rand}_{i,j} > CR \text{ and } j \neq I_{rand} \end{cases} \quad (2.6)$$

โดย $U_{i,G+1}$ คือ Trial vector
 $V_{i,j,G+1}$ คือ Mutant vector
 $X_{i,j,G}$ คือ Target vector
 $\text{rand}_{i,j}$ คือ การสุ่มตัวเลขจำนวนจริงที่มีค่าระหว่าง 0 ถึง 1
 CR คือ Crossover Rate มีค่าเป็นเลขจำนวนจริงระหว่าง 0.1 ถึง 0.9



ภาพ 2.10 การ Crossover ของ Target Vector และ Mutant Vector

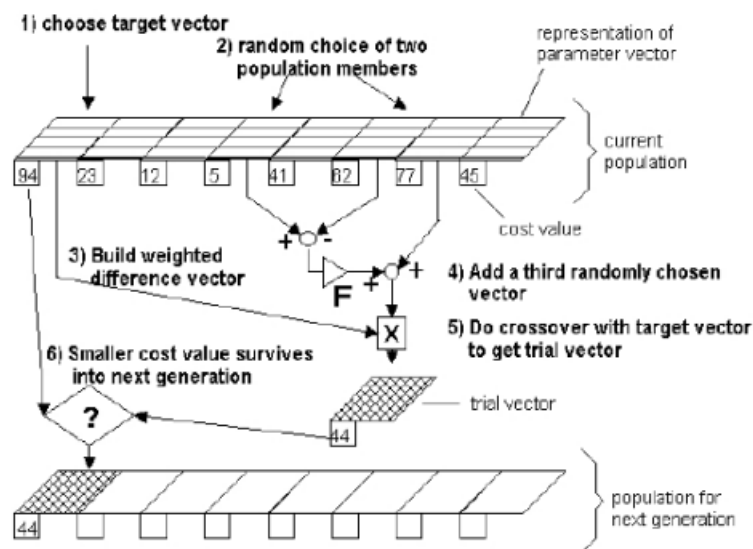
ที่มีค่า $D=7$ ที่มา: Storn and Price (1997)

2.5.4 Selection

คือขั้นตอนการคัดเลือกประชากรในรุ่นต่อไป ($G+1$) โดยคัดเลือกเอาแต่เฉพาะ ค่าตอบที่ ดีกว่า โดยการเปรียบเทียบ Function Value หรือ Cost Value ของ Trial Vector กับ Target Vector ในกรณีที่ค่า Function Value ของ Trial Vector ดีกว่า Target Vector จะถูกแทนที่ด้วย Trial Vector ในรุ่นต่อไป

2.5.5 Evaluation & Re-Generation ดำเนินการซ้ำจากข้อ 2 ถึงข้อ 4 โดยเปลี่ยน Target Vector จนถึง $i = NP$

2.5.6 Reach Convergence Tolerance นำ Target Vector ที่ได้จากข้อ 4 มาทำซ้ำขั้นตอน ทั้งหมด จนครบตามความต้องการ โดยแสดงในภาพ 2.11 เป็นการแสดงขั้นตอนการหาค่าความ เหมาะสมโดยวิธี Differential Evolution สำหรับปัญหาการหาค่าต่ำสุดและค่าสูงสุด (Min-Max Optimization Problem)



ภาพ 2.11 กระบวนการหาค่าความเหมาะสมโดยวิธี DE จากขั้นที่ 1-4

ที่มา: Price and Storn (2005)

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

น้ำฝน ไชยลังกา¹ นักรบ นาคประสม¹ และ ฤทธิชัย อัครราชันย์^{1*}(2556) งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการหาเหมาะสมสำหรับการอบแห้งแครอทแผ่น ไมโครเวฟต่อการเปลี่ยนแปลงความแตกต่าง ของแครอทอบแห้งโดยใช้วิธีพื้นผิว การออกแบบการทดลอง Box-Behnken โดย ที่ศึกษาประกอบด้วยระดับพลังงานคลื่นไมโครเวฟที่ใช้ในการอบแห้ง ความเข้มข้นของกรดแอสคอร์บิก และ สภาวะที่ เวลาที่ใช้แช่แครอทแผ่นในกรดแอสคอร์บิก ส่วนตัวแปร ด้วยคลื่น ตามที่ต้องการศึกษาได้แก่ ค่าความแตกต่างสีโดยรวม สีโดยรวม (AE) ผลการศึกษาพบว่าความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัย ตอบสนองและ กับค่าการตอบสนองของปัจจัยเป็นสมการการถดถอย ตัวแปรต้น ตามสมการ $Y = 114 + 0.61X_1 + 0.18X_2 - 0.150X_3 - 1.56X_4 + 0.22X_5 - 0.45X_6 + 5.18X_7 + 0.41X_8 - 106.X$ และการวิเคราะห์หาสภาวะที่เหมาะสมในการ 3.56 เปอร์เซ็นต์ และเวลาที่ใช้แช่ 4.94 นาที เป็นสภาวะ จบแห้งแครอทแผ่น คือที่ระดับพลังงานคลื่นไมโครเวฟ เหมาะสมการอบแห้งแครอทแผ่นอบแห้งด้วยคลื่น 42587 วัตต์ ความเข้มข้นของกรดแอสคอร์บิก ไมโครเวฟโดยให้ AE ต่ำที่สุดซึ่งมีค่าเท่ากับ 3.06

พรทิพย์ และ กิตติชัย (2561) จากผลการศึกษาสรุปได้ว่าวิธีพื้นผิวตอบสนองและการออกแบบการทดลองแบบประสมกลางสามารถนำมาประยุกต์ใช้สำหรับสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับทำนายและหาค่าสถานะที่เหมาะสมของตัวแปรในการสกัดน้ำมันจาก เมล็ดมะละกอได้เป็นอย่างดี โดยพบว่าสถานะที่เหมาะสมในการสกัดเพื่อให้ได้ปริมาณน้ำมันเมล็ด - มะละกอสูงที่สุดคือ ใช้เวลาในการสกัด 2.32 นาที ที่ระดับกำลังไฟฟ้า 800 วัตต์ ด้วยอัตราส่วน 4 ระหว่างเมล็ดมะละกอต่อตัวทำละลาย 7% จะได้ปริมาณผลผลิตน้ำมันเมล็ดมะละกอ 28% ซึ่งจากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์พลังงานไฟฟ้า พบว่าที่ระดับกำลังไฟฟ้า 800 วัตต์ นอกจาก จะใช้ระยะเวลาในการสกัดน้อยกว่าแล้วยังใช้ พลังงานไฟฟ้าที่ต่ำกว่าอีกด้วย และจากการทำการ ทดลองซ้ำเพื่อทวนสอบความเที่ยงตรงของ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์พบว่า ปริมาณ ผลผลิตน้ำมันเมล็ดมะละกอที่ได้จากการทำนาย โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับค่าที่ได้จาก การทดลองมีความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% และมีความสัมพันธ์ ในทิศทางเดียวกัน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแบบจำลอง ทางคณิตศาสตร์ที่ได้สามารถทำนายปริมาณ วที่ ผลผลิตน้ำมันเมล็ดมะละกอได้ใกล้เคียงกับผล การทดลองจริงและสามารถนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ไปใช้งานจริงได้

พรณทิพย์ และ ราตรี (2015) การศึกษาสถานะที่เหมาะสมในการสกัดสี้อมจากกลีบดอกอัญชัน จากตัวแปรอิสระ 3 ตัวแปร คือ ระยะเวลาในการสกัด (X1) อุณหภูมิในการสกัด (X2) และปริมาณกลีบดอกอัญชันที่ใช้ในการสกัด (3) ผลของสถานะที่เหมาะสมในการสกัดสี้อมจาก กลีบดอกอัญชันดูจากค่าที่มากที่สุดในการดูดกลืนแสงของสารสกัดที่ความยาวคลื่น 575 นาโนเมตร ซึ่งวัดด้วยเครื่องวัด การดูดกลืนแสง (UV-Visible spectrophotometer) โดยประยุกต์ใช้วิธีวิเคราะห์ข้อมูลทางคณิตศาสตร์และสถิติด้วยวิธีพื้นผิว ตอบสนอง (RSM) ร่วมกับการออกแบบการทดลองแบบประสมกลาง (CCD) และประมวลผลด้วยโปรแกรม RGui386 version 3.2.0 พบว่า ตัวแปรทั้ง 3 ตัวแปร มีความสัมพันธ์ซึ่งกันและกัน ซึ่งสามารถแสดงในรูปของสมการสำหรับทำนายค่าการดูดกลืนแสง ของสี้อมที่สกัดได้จากกลีบดอกอัญชัน คือความเข้มของแสงที่สกัดได้เท่ากับ $2.81 - 0.00142X_1 + 0.23923X_2 + 0.565139X_3 + 0.1874306X_1X_2 + 0.0565139X_2X_3 - 0.4782210X_2 - 0.2904448X_2^2 - 0.5829906X_3^2$ โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เท่ากับ 0.94 เมื่อนำมาหาค่าปัจจัยที่เหมาะสมที่สุด (stationary point) พบว่า สถานะที่เหมาะสมที่สุดในการสกัดสี้อมจากกลีบดอก อัญชันคือ ระยะเวลาในการสกัดที่ 88 นาที อุณหภูมิ 78 องศาเซลเซียส โดยใช้ปริมาณกลีบดอกอัญชัน 1.25 กรัม จะได้ค่า การดูดกลืนของแสงจากสี้อมที่สกัดได้สูงสุดคือ 2.955 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เท่ากับ 0.94 ซึ่งใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการประมวลผลจากโปรแกรม (3.051) และใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการทดลองจริง (3.000) ที่ใช้ระยะเวลาในการสกัด 120 นาที อุณหภูมิ 90°C ปริมาณกลีบดอกอัญชัน 2 กรัม

พิชิต และ สุพิชญา (2554) การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการสกัด TPC, TFC และฤทธิ์ในการต้านอนุมูลอิสระเมื่อทดสอบด้วยวิธี FRAP และ ABTS" จากมะม่วงหาวมะนาวโห่ผลสีเขียวชมพู (ผลดิบ) ด้วยตัวทำละลายเอทานอลในสภาวะกรดโดยวิธี RSM ร่วมกับการ วางแผนการทดลองแบบ CCD จำนวน 5 ระดับ (-2, -1, 0, +1 และ +2) และ 5 ปัจจัย ได้แก่ อัตราส่วนระหว่างมะม่วงหาว มะนาวโห่ต่อเอทานอล (A) ความเข้มข้นของเอทานอล (B) ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริก (C) เวลาที่ใช้ในการสกัด (D) และอุณหภูมิในการสกัด (E) จำนวน 50 การทดลอง พบว่า A, B, C, D และ E เป็นปัจจัยที่มีผลต่อการเพิ่มการสกัด TPC, TFC และ ฤทธิ์ในการต้านอนุมูลอิสระเมื่อทดสอบด้วยวิธี FRAP และ ABTS" อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ซึ่งสามารถแสดงได้ ในรูปของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กำลังสองสำหรับทำนายค่า TPC, TFC, FRAP และ ABTS" โดยมีค่า R เท่ากับ 0.9714, 0.9837, 0.9844 และ 0.9777 ตามลำดับ เมื่อนำมาหาค่าระดับของปัจจัยทั้ง 5 พบว่าสภาวะของการสกัดที่เหมาะสม ประกอบด้วยอัตราส่วนระหว่างมะม่วงหาวมะนาวโห่ต่อเอทานอล 1:80 กรัมต่อมิลลิกรัม ความเข้มข้นของเอทานอล 70 เปอร์เซ็นต์ ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริก 0.6 เปอร์เซ็นต์ เวลาที่ใช้ในการสกัด 2.5 ชั่วโมง และอุณหภูมิในการสกัด 50 องศาเซลเซียส พบว่าสามารถสกัด TPC และ TFC ได้เท่ากับ 17.80 mg GAE/g และ 29.28mg RE/g ตามลำดับ และเมื่อ ทดสอบฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี FRAP และ ABTS" มีค่าเท่ากับ 30.52 และ 20.24 mg TE/g ตามลำดับ ซึ่งใกล้เคียง กับค่าที่ได้จากการทำนายด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และมีค่าความผิดพลาดอยู่ในช่วง 0.91-2.41 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นจาก ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้จากวิธี RSM สามารถใช้ทำนายค่า TPC, TFC, FRAP และ ABTS" ได้อย่างมีประสิทธิภาพเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดสารจากมะม่วงหาวมะนาวโห่ผลสีเขียวชมพู

บทที่ 3

วิธีการวิจัย สถานที่ดำเนินงานวิจัย

การดำเนินโครงการวิจัย การหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการอบแห้งเนื้อปลับขึ้นบกกิ่งแห้ง (ปลับหมาด) โดยใช้วิธีพื้นผิวตอบสนอง เป็นการดำเนินโครงการวิจัยตามคำแนะนำของโครงการการพัฒนาเครื่องอบแห้งระบบถาดหมุนในการอบแห้งปลับขึ้นบกกิ่งแห้ง ซึ่งดำเนินการออกแบบเครื่องอบแห้งลมร้อนขนาด 20 ถาด ต่อยอดจากเครื่องอบแห้งระบบลมร้อนระบบถาดหมุน (เลขที่อนุสิทธิบัตร 18896) และติดตั้งที่ศูนย์พัฒนาโครงการหลวงแม่แฮ จำนวน 3 เครื่อง ดำเนินการติดตั้ง และทดสอบการอบแห้งปลับ โดยแสดงในภาพ 3.1 อย่างไรก็ตามเพื่อให้การดำเนินโครงการสมบูรณ์จำเป็นต้องมีการศึกษาตัวแปรต้น ได้แก่ อุณหภูมิ ความเร็วลม และความเข้มข้นของเข้มข้นของสารป้องกันการเกิดสีน้ำตาล ดังนั้นการศึกษานี้เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมของการอบขึ้นปลับบกกิ่งแห้งด้วยเครื่องอบแห้งระบบถาดหมุน โดยเทคนิคพื้นผิวตอบสนอง (Response surface methodology, RSM) วางแผนการทดลองแบบ Central composite design (CCD) เพื่อศึกษาผลของตัวแปรอิสระ 3 ปัจจัย คือ อุณหภูมิลมร้อน 3 ระดับ คือ 45, 55 และ 65 องศาเซลเซียส ค่าความเร็วลม 3 ระดับ คือ 0.32, 0.54 และ 0.81 เมตรต่อวินาที และความเข้มข้นของสารป้องกันการเกิดสีน้ำตาล 3 ระดับ คือ 500, 1,000 และ 1,500 พีพีเอ็ม ต่อค่าคุณภาพที่นำมาศึกษา ได้แก่ สมบัติทางทัศนศาสตร์ในระบบสี CIE-L*a*b* สารประกอบฟีนอลิกรวม (Total phenolic content, TPC) และความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ วิธี Scavenging activity of DPPH radical และ ABTS radical ตามลำดับ ด้วยเทคนิควิเคราะห์แบบ บ็อกซ์-เบห์นเคน (Box-Behken Design BBD) ดังมีรายละเอียดดังนี้



ภาพ 3.1 เครื่องอบแห้งระบบถาดหมุน

3.1 สารเคมีและอุปกรณ์

3.1.1 วัตถุดิบอาหาร

- โปตัสเซียมเมตริกัลไฟต์ (KMS, Food grade)

3.1.2 สารเคมีที่ใช้ในการวิเคราะห์ปริมาณกรดที่ไทเทรต

- โปตัสเซียมไฮโดรเจนพทาเลต ($\text{KHC}_8\text{H}_4\text{O}_4$, Fluka, A.R. grade)
- สารฟีนอลทาลีน (Phenolphthalein, Ajax Finechem, A.R. grade)
- สารโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH , Merck, A.R. grade)

3.1.3 สารเคมีที่ใช้ในการวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลรีดิวส์ และน้ำตาลทั้งหมด

- กรดซัลฟิวริก (H_2SO_4 , RCI Labscan, A.R. grade)
- กลูโคส (D-glucose, Ajax Finechem, A.R. grade)
- โพแทสเซียมโซเดียมทาร์เทรต ($\text{KNaC}_4\text{H}_4\text{O}_6$, Ajax Finechem, A.R. grade)
- สารโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH , Merck, A.R. grade)
- กรดไดไนโตรซาลิไซลิก (3,5-Dinitrosalicylic acid; DNS, Aldrich, A.R. grade)

3.1.4 สารเคมีที่ใช้ในการการวิเคราะห์ค่าดัชนีการเกิดสีน้ำตาล

- กรดแอสติค (RCI Labscan, A.R. grade)

3.1.5 สารเคมีที่ใช้ในการวิเคราะห์สารประกอบสารประกอบไฮดรอกซิลเมทิลเพอร์ฟูรอล

- ไฮดรอกซิลเมทิลเพอร์ฟูรอล (5-hydroxymethyl-2-furfural, Sigma-Aldrich, A.R. grade)
- กรดไตรคลอโรแอสติค (Merck, A.R. grade)
- กรดไทคลอโรบาร์บิturic (Fluka, A.R. grade)
- เอทานอล (Ethanol, RCI Labscan, A.R. grade)

3.1.6 สารเคมีที่ใช้ในการวิเคราะห์ปริมาณซัลเฟอร์ที่ตกค้าง

- กรดฟอสฟอริก (Ortho-Phosphoric acid 85%, Merck, A.R. grade)
- สารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2 , Merck, A.R. grade)
- สารโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH , Merck, A.R. grade)
- สารเมทิลเรด (methyl red, Ajax Finechem, A.R. grade)
- สารเมทิลีนบลู (methylene blue, Ajax Finechem, A.R. grade)

3.1.7 สารเคมีที่ใช้ในการวิเคราะห์กิจกรรมของเอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดส

- สารโซเดียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต (NaH_2PO_4 , QRec, A.R. grade)

- สารได-โซเดียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต (Na_2HPO_4 , QRec, A.R. grade)
- แคตาคอล (Sigma-Aldrich, A.R. grade)
- สารโซเดียมคลอไรด์ (NaCl , Loba Chemie, A.R. grade)

3.1.8 สารเคมีที่ใช้ในการวิเคราะห์ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด

- เมทานอล (Methanol, RCI Labscan, A.R. grade)
- สาร Folin-ciocalteu reagent (RCI Labscan, A.R. grade)
- กรดแกลลิก (Sigma-Aldrich, A.R. grade)
- โซเดียมคลอไรด์ (Sigma-Aldrich, A.R. grade)

3.1.9 สารเคมีที่ใช้ในการวิเคราะห์ฤทธิ์ในการต้านอนุมูลอิสระ

- ไดฟิซิลไฮดราซิล (2,2-Diphenyl-1-picrylhydrazyl; DPPH, Aldrich, A.R. grade)
- ไทโรพริดีลเทรียซีน (2,4,6-tripyridyl-s-triazine; TPTZ, Fluka, A.R. grade)
- สารเฟอร์ริกคลอไรด์ (FeCl_3 , Loba Chemie, A.R. grade)

3.1.10 สารเคมีที่ใช้ในการวิเคราะห์ค่าขึ้นสมดุล

- สารลิเทียมคลอไรด์ (LiCl , Merck, A.R. grade)
- สารแมกนีเซียมคลอไรด์เฮกซะไฮเดรต ($\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, Merck, A.R. grade)
- สารแมกนีเซียมไนเตรตเฮกซะไฮเดรต ($\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, Merck, A.R. grade)
- สารโซเดียมคลอไรด์ (NaCl , Merck, A.R. grade)
- สารโพแทสเซียมไนเตรต (KNO_3 , Merck, A.R. grade)
- สารโพแทสเซียมซัลเฟต (K_2SO_4 , Merck, A.R. grade)

3.1.11 สารเคมีที่ใช้ในการตรวจวิเคราะห์จุลินทรีย์ และอายุการเก็บรักษา

- แผ่นตรวจเชื้อสำเร็จรูป 3M™ Petrifilm™ TPC
- แผ่นตรวจเชื้อสำเร็จรูป 3M™ Petrifilm™ Yeast and Mold Count Plat
- อาหารเลี้ยงเชื้อ (plate count agar; PCD, Himedia)
- อาหารเลี้ยงเชื้อ (potato dextrose agar; Himedia)
- อาหารเลี้ยงเชื้อ (peptone; Himedia)

3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์

3.2.1 เครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่ง (analytical balance, Sartorius model CP 224S)

3.2.2 ตู้อบแห้งลมร้อน (Hot air oven, Memmert model UF 110)

3.2.3 อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ (water bath, Memmert model WNB22)

3.2.4 เครื่องวัดความเป็นกรด-ด่าง (pH meter, Metrohm model 744)

3.2.5 เครื่องวัดปริมาณน้ำอิสระ (water activity meter)

3.2.6 เครื่องปั่นเหวี่ยง (centrifuge, Sorvall model RC-5 plus)

3.2.7 เครื่องเขย่าสารแนวราบ (orbital shake, Ratek model OM8)

3.2.8 เครื่องวัดสีในระบบ CIE L*a*b*

3.2.9 ตู้บ่ม (incubator, Termaks 8000)

3.2.10 อุปกรณ์เครื่องแก้ว ประกอบด้วยหลอดทดลองฝาเกลียว กรองขวดปรับปริมาตร แท่งแก้วคนสาร จานเพาะเชื้อ ชุดกลั่นซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ภาชนะอลูมิเนียม (moisture can 2oz) โถดูดความชื้น ขวดน้ำกลั่น อะลูมิเนียมฟอยด์ ถุงมือยาง หน้ากากอนามัย เครื่องครัว

3.3 วิธีดำเนินการวิจัย (Material and Method)

3.3.1. วัตถุดิบ

วัตถุดิบที่ใช้ในการศึกษาวิจัยนี้ คือ ผลพลับพันธุ์ P2 เป็นลูกพลับที่ตกเกรดจากการคัดบรรจุของ ศูนย์พัฒนาโครงการหลวงแม่แฮ จังหวัดเชียงใหม่ โดยมีขนาดความกว้าง ความยาว และความหนาเท่ากับ 5.41 ± 0.83 , 5.08 ± 0.43 และ 3.21 ± 0.73 เซนติเมตร ตามลำดับ โดยมีน้ำหนักเฉลี่ยเท่ากับ 10.4 ± 1.72 กรัมต่อลูก (ประมาณ 10-12 ลูกต่อหนึ่งกิโลกรัม) ซึ่งเป็นลูกพลับที่ไม่ตรงกับความต้องการของผู้บริโภค ไม่สามารถนำไปขายเป็นผลสดได้ อย่างไรก็ตามจากผลการศึกษาของ ฝ่ายงานวิจัยและพัฒนาไม้ผลของศูนย์พัฒนาโครงการหลวงพบว่าผลผลิตของลูกพลับ 1 ต้นจะมีลูกพลับเท่ากับ 150-200 กิโลกรัม โดยแบ่งเป็นพลับที่ได้มาตรฐาน มีขนาดใหญ่ มีน้ำหนักเฉลี่ย 130-150 กรัมต่อลูก โดยคิดเป็นร้อยละ 60 ของผลผลิตทั้งหมด ดังนั้นพลับที่นำมาใช้ในการศึกษาทดลองนี้มีร้อยละ 30 คิดเป็นผลผลิตต่อต้นเท่ากับ 45-60 กิโลกรัม สามารถประเมินเป็นปริมาณลูกพลับที่ตกเกรดในพื้นที่เท่ากับ 1,260 ตัน (หมายเหตุ ลูกพลับร้อยละ 10 เป็นลูกพลับที่มีผลลีบ ลูกเล็กมาก และเน่าเสีย) ดังนั้นโครงการวิจัยนี้จึงได้ใช้ลูกพลับตกเกรดดังกล่าวเพื่อใช้ในการศึกษา ผลพลับที่ใช้ในการศึกษานี้ เป็นผลพลับที่ความสุกด้วยวิธีการบ่มสารละลายเอทานอลความเข้มข้น 95 เปอร์เซ็นต์ โดยใช้สัดส่วนสารละลายเอทานอล 15 มิลลิลิตรต่อการบ่มลูกพลับจำนวน 5 กิโลกรัมเป็นเวลา 3 วัน



(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

ภาพ 3.2 ปลั๊บลายพันธุ์ P2 ที่ใช้ในโครงการวิจัย



(ก)



(ข)



(ค)



(ง)



(จ)



(ฉ)



(ช)



(ซ)



(ณ)

ภาพ 3.3 ขั้นตอนการเตรียมการอบแห้งพลับ (ก) ล้างทำความสะอาดเปลือกพลับ (ข) ปอกเปลือกพลับ (ค) หั่นพลับเป็นชิ้น 4 ส่วน (ง) ล้างพลับที่ปอกเปลือกด้วยน้ำสะอาด (จ) แช่พลับในสารป้องกันการเกิดสีน้ำตาล (ins224) (ฉ) - (ซ) นำพลับที่แช่สารป้องกันการเกิดสีน้ำตาล (ins224) ขึ้นมาเรียงในตะแกรง (ณ) นำพลับไปอบแห้งที่เครื่องอบรุ่น Memmert UF 110



(ก)



(ข)



(ค)



(ง)



(จ)



(ฉ)

ภาพ 3.4 ขั้นตอนการเตรียมการอบแห้งพลับ(ก) นำพลับไปอบแห้งที่เครื่องอบ memmert UF 110 (ข) ตั้งเวลา 8 ชั่วโมง อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส ความเร็วลม 0.81 เมตรต่อวินาที (ค) นำพลับที่อบครบ 8 ชั่วโมงมานวดเพื่อให้เนื้อเยื่อแตกตัวทำให้น้ำตาลแพร่ออกมาที่ผิวของพลับได้ (ง) พลับหลังการนวดเสร็จ (จ) ใส่บรรจุภัณฑ์ (ฉ) เก็บไว้ที่อุณหภูมิ 2 -4 องศา

3.3.2 สมบัติเชิงทัศนศาสตร์ (optical properties) เครื่องวัดค่าสีในระบบ CIE L*a*b*

นำตัวอย่างเนื้อปลับสด และอบแห้งด้วยการใช้อุณหภูมิทั้งสามระดับ (45, 55 และ 65 องศาเซลเซียส และความเร็วลม (ระดับ 0.32, 0.54 และ 0.81 เมตรต่อวินาที) จนปลับแห้งมีค่าความชื้นสุดท้าย 22-25 % (น้ำหนักเปียก) จากนั้นวัดอัตราการใช้พลังงานเฉพาะในระหว่างการอบแห้ง (SEC:specific energy consumption) ด้วยเครื่องวัดพลังงานรุ่น KM-07-A-2 (Primus Company Limited, Thailand) และวัดค่าสีของเนื้อปลับอบแห้งด้วยเครื่องวัดสีด้วยเครื่อง Spectrophotometer (HunterLabModelMiniScan XE PLUS) ครั้งละ 300±15 กรัม โดยวัดค่าสีในระบบ CIE-Lab scale ในรูปแบบของค่าความสว่าง/ความมืด (L^*) ค่าความเป็นสีแดง/สีเขียว (a^*) ค่าความเป็นสีเหลือง/สีน้ำเงิน (b^*) และค่าความแตกต่างสีโดยรวม (ΔE) ของเนื้อปลับอบแห้งที่สภาวะต่างๆ โดยมีสมการความสัมพันธ์ตามที่แสดงในสมการ

$$\Delta E = \sqrt{(L_0^* - L_t^*)^2 + (a_0^* - a_t^*)^2 + (b_0^* - b_t^*)^2}$$

เมื่อ L_t^* , a_t^* และ b_t^* คือ ค่าพารามิเตอร์สีของเนื้อปลับอบแห้งในระหว่างการอบแห้งที่เวลาใด ๆ และ L_0^* , a_0^* และ b_0^* คือ ค่าพารามิเตอร์สีของปลับสด



(ก)



(ข)

ภาพ 3.5 การวิเคราะห์ค่าสีด้วย เครื่อง Spectrophotometer (HunterLabModelMiniScan XE PLUS)

3.3.3 การวิเคราะห์สมบัติทางเคมี

การวิเคราะห์สมบัติทางเคมีของเนื้อลูกพลับสด และพลับอบแห้ง ได้แก่ การวิเคราะห์ความเป็นกรด-ด่าง ปริมาณกรดที่ไทเทรตได้ ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์และปริมาณน้ำตาลทั้งหมด ค่าดัชนีการเกิดสีน้ำตาล ปริมาณสารประกอบไฮดรอกซิลเมทิลเฟอรูโรล และปริมาณซัลเฟอร์ไดออกไซด์ โดยมีรายละเอียดดังนี้

- การวิเคราะห์ความเป็นกรด-ด่าง : โดยเครื่องวัดความเป็นกรด-ด่าง (ซึ่งได้ปรับค่ามาตรฐานด้วยสารละลายมาตรฐานที่มีค่ากรดต่าง เท่ากับ 4.00 และ 7.00 ตามลำดับ
- ปริมาณกรดที่ไทเทรต : เตรียมตัวอย่างเนื้อพลับสด 2 กรัม ใส่ในขวดรูปชมพู่เจือจางด้วยน้ำกลั่น 20 เท่า กรองผ่านกระดาษกรองเบอร์ 1 ปีเปตสารละลายส่วนในปริมาณ 10 มิลลิลิตรและเติมน้ำกลั่นปริมาณ 90 มิลลิลิตร หยดสารละลายฟีนอล์ฟทาลีน 2-3 หยด เขย่าสารละลาย จากนั้นนำไปไทเทรตด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.1 โมลาร์ จนถึงจุดยุติเป็นสีชมพูอ่อน คำนวณปริมาณกรดทั้งหมด ตามสมการ

$$\text{ปริมาณกรดทั้งหมด} = \frac{0.7 \text{ ปริมาตรของ NaOH} \times \text{dilution factor}}{1,000} \times 100$$

ในรูปของกรดซิตริก (%)

- ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์: เตรียมตัวอย่างเนื้อพลับสด 5 กรัม เติมน้ำกลั่น 10 มิลลิลิตร ต้มที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที กรองผ่านกระดาษกรองเบอร์ 1 ปรับปริมาตรให้ได้ 100 มิลลิลิตร นำสารละลายที่ได้จำนวน 0.2 มิลลิลิตร เติม DNS reagent จำนวน 2 มิลลิลิตร และน้ำกลั่น 5.9 มิลลิลิตร เขย่าและต้มให้ความร้อน 100 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 5 นาที ทำให้เย็นจนถึงอุณหภูมิห้อง แล้วนำไปวัดค่าดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 540 นาโนเมตร เปรียบเทียบกับค่ากราฟมาตรฐาน (ภาคผนวก)
- ปริมาณน้ำตาลทั้งหมด : เตรียมตัวอย่างเนื้อพลับสด 2.5 กรัม เติมกรดซัลฟิวริกความเข้มข้น 1.5 โมลาร์ จำนวน 10 มิลลิลิตร ต้มที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 นาที จุ่มในน้ำเย็นทันที เติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 10 จำนวน 12 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากัน กรองผ่านกระดาษกรอง ปรับปริมาตรให้เป็น 100 มิลลิลิตร จากนั้นนำสารละลายที่ได้จำนวน 0.2 มิลลิลิตร เติม DNS reagent จำนวน 2 มิลลิลิตร และน้ำกลั่น 5.9 มิลลิลิตร เขย่าและต้มให้ความร้อน 100 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 5 นาที ทำให้เย็นจนถึงอุณหภูมิห้อง แล้วนำไปวัดค่าดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 540 นาโนเมตร เปรียบเทียบกับค่ากราฟมาตรฐาน รายงานหน่วยปริมาณน้ำตาลทั้งหมด เป็นมิลลิกรัมต่อ 100 กรัมตัวอย่าง

- ค่าดัชนีการเกิดสีน้ำตาล : เตรียมตัวอย่างเนื้อพลับพด 2 กรัม เติมกรดอะซิติกร้อยละ 2 จำนวน 20 มิลลิลิตร ผสมทิ้งไว้ 10 นาที นำไปปั่น 30 วินาที กรองผ่านกระดาษกรองเบอร์ 1 แล้วนำไปวัดค่าดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 420 นาโนเมตร
- ปริมาณสารประกอบไฮดรอกซิลเมทิลเฟอรูล : เตรียมตัวอย่างเนื้อพลับพด 2 กรัม เติมเอทานอลความเข้มข้น 95 เปอร์เซ็นต์ จำนวน 20 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากันเป็นเวลา 1 นาที นำไปปั่นเหวี่ยงที่ความเร็ว 9,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 40 นาที กรองผ่านกระดาษกรองเบอร์ 1 นำตัวอย่างใส่ในหลอดทดลอง 2 มิลลิลิตร เติมกรดไตรคลอโรแอสिटิดความเข้มข้น 12 เปอร์เซ็นต์ จำนวน 2 มิลลิลิตร และกรดไทคลอโรบาร์บิทรिक ความเข้มข้น 2.5 โมลาร์ จำนวน 2 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากันต้มในอ่างควบคุมอุณหภูมิที่ 40 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 50 นาที ทำให้เย็นทันที นำสารละลายที่ได้จำนวน 2 มิลลิลิตร เติมกรดไตรคลอโรแอสिटิด 12 เปอร์เซ็นต์ จำนวน 4 มิลลิลิตร แล้วนำไปวัดค่าดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 443 นาโนเมตร
- ปริมาณซัลเฟอร์ไดออกไซด์ : เตรียมตัวอย่างเนื้อพลับพด 3 กรัม เติมเอทานอลความเข้มข้น 95 เปอร์เซ็นต์ จำนวน 2 มิลลิลิตร และน้ำกลั่น 40 มิลลิลิตร ต่อเข้าชุดกลั่นที่มีสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 0.3 เปอร์เซ็นต์ จำนวน 20 มิลลิลิตร เติมอินดิเคเตอร์เมทิลเรดเมทิลีนบลู 2-3 หยด จนสารละลายเป็นสีม่วง หยดสารโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.01 นอร์มอลจนได้สารละลายสีเขียว จากนั้นนำกลั่นสารละลายสีเขียวด้วยความร้อนเป็นเวลา 45 นาที นำสารละลายที่กลั่นได้ (สีม่วง) ไทเทรตกับสารโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.01 นอร์มอล นำข้อมูลไปคำนวณปริมาณซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ตกค้าง



(ก)

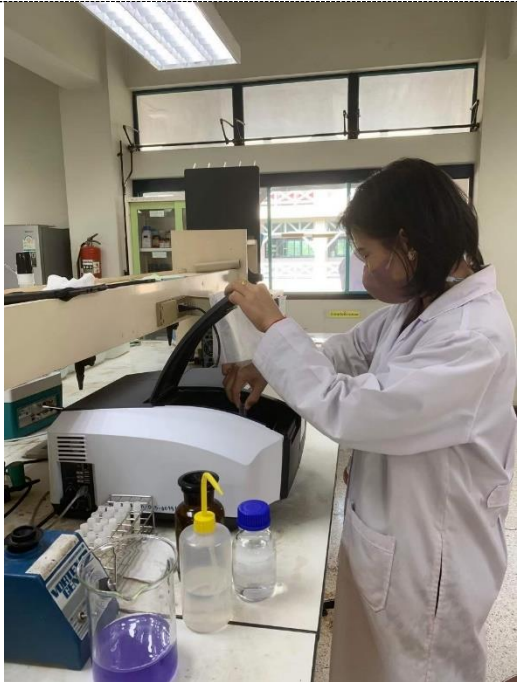


(ข)

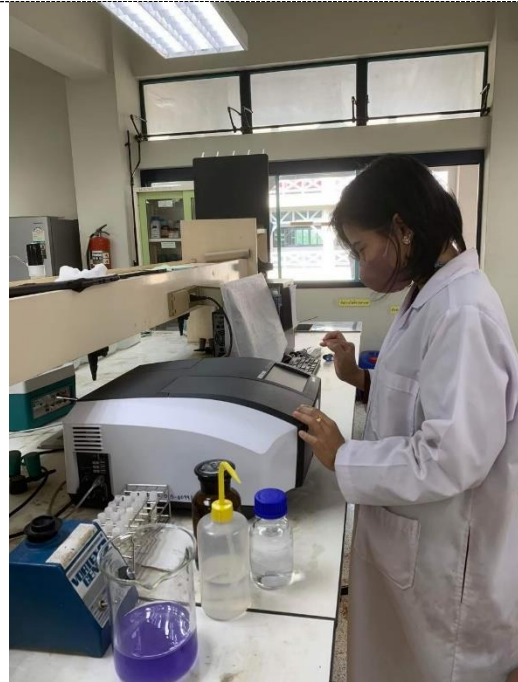


(ค)

ภาพ 3.6 ขั้นตอนการวิเคราะห์สมบัติทางเคมีของเนื้อลูกพลับพด และพลับพดทั้งแห้ง



(ก)



(ข)



(ค)

ภาพ 3.7 ขั้นตอนการวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์และปริมาณน้ำตาลทั้งหมด ค่าดัชนีการเกิดสีน้ำตาล ปริมาณสารประกอบไฮดรอกซิลเมทิลฟอร์ฟูรอล และปริมาณซัลเฟอร์ไดออกไซด์ด้วยวัดค่าดูดกลืนแสง

3.3.4 การวิเคราะห์สารประกอบฟีนอลิกรวม

วิเคราะห์หาปริมาณสารประกอบฟีนอลิกรวม (total phenolic content) โดยวิธี Folin-Ciocalteu Colorimetric Method ตามวิธีการของ Sachindra และคณะ (2010) ใช้สารมาตรฐานกรดแกลลิก (gallic acid) ที่ 5 ระดับความเข้มข้น ได้แก่ 0.05, 0.10, 0.15, 0.20 และ 0.25 กรัมต่อลิตร และเตรียมเนื้อพื้บแห้ง ที่ผ่านการบดจำนวน 0.5 กรัม ละลายในน้ำกลั่น จำนวน 5 มิลลิลิตร ผสมให้เป็นเนื้อเดียวกัน จากนั้นนำไปปั่นเหวี่ยงเพื่อแยกตะกอน ที่ความเร็วรอบ 2,500 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 10 นาที นำมาทดสอบดังนี้ นำตัวอย่างสารสกัดเนื้อพื้บแห้ง ที่ละลายในน้ำกลั่น (supernatant) ความเข้มข้น 10 มิลลิลิตรต่อมิลลิกรัม จำนวน 0.2 มิลลิลิตรใส่ในหลอดทดลอง เติมน้ำกลั่นละลาย folin-ciocalteu ความเข้มข้น 10 เปอร์เซ็นต์จำนวน 1 มิลลิลิตรและเติมน้ำกลั่นโซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3) ความเข้มข้น 7.5 เปอร์เซ็นต์จำนวน 0.8 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากันและตั้งทิ้งไว้เป็นเวลา 1 ชั่วโมงที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นอ่านค่าจากการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 765 นาโนเมตร จากนั้นนำข้อมูลไปคำนวณปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดโดยเทียบกับสารมาตรฐานกรดแกลลิก



(ก)



(ข)



(ค)

ภาพ 3.8 ขั้นตอนการวิเคราะห์ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกรวม

(ก) เติมน้ำกลั่นละลายสำหรับสกัดสารประกอบฟีนอลิกรวมซึ่งมีส่วนผสมของ 0.3% (w/v) AlCl_3 และ 0.03 M potassium acetate ปริมาตร 100 μl ลงใน Microplate (ข) วัดปริมาณ สารประกอบฟีนอลิกรวม เติมน้ำกลั่นละลายสำหรับสกัดสารประกอบฟีนอลิกรวมซึ่งมีส่วนผสมของ 0.3% (w/v) AlCl_3 และ 0.03 M potassium acetate ปริมาตร 100 μl ลงใน Microplate (ค) วัดค่าการดูดกลืนแสงของสารผสม

3.3.5 การวิเคราะห์ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ

■ วิธี Scavenging activity of ABTS radical

นำเนื้อปลั้บอบแห้งที่ผ่านการบด ชั่งน้ำหนักแห้งประมาณ 0.5 กรัมเติมน้ำกลั่น ปริมาตร 10 มิลลิลิตรผสมให้เป็นเนื้อเดียวกันจากนั้นนำไปปั่นเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 2,500 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาทีดูดตัวอย่างสารสกัดน้ำของสาหร่ายเตาไว้ การทดสอบความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระวิธี ABTS ได้ดัดแปลงจากวิธีของ Re และคณะ (1999) ดังนี้ เตรียมสาร ABTS [2,2'-azino-bis (3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid)] ที่มีความเข้มข้น 7 มิลลิโมลที่ปริมาตร 5 มิลลิลิตร และสาร potassium persulfate ($K_2S_2O_8$) ที่มีความเข้มข้น 140 mM ปริมาตร 88 มิลลิลิตร จากนั้นผสมสารละลาย 7 mM ABTS และ 140 mM $K_2S_2O_8$ ในขวดสีชา ตั้งทิ้งไว้ในที่มืด 16 ชั่วโมงที่อุณหภูมิห้อง จะได้ ABTS radical cation stock solution หลังจากนั้นทำการเจือจาง ABTS radical cation stock solution ด้วยน้ำกลั่นให้ค่าดูดกลืนแสงที่ 734 นาโนเมตรเท่ากับ 0.700 ± 0.020 เติมสารละลาย ABTS radical cation ปริมาตร 1 มิลลิลิตรลงในหลอดทดลอง และใช้น้ำกลั่นเป็นชุดควบคุม จากนั้นเติมตัวอย่างสารสกัดน้ำของสาหร่ายเตาที่ละลายใน dimethyl sulfoxide ความเข้มข้น 1 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตรที่ปริมาตร 10 ไมโครลิตร ผสมให้เข้ากันด้วย vortex mixer ตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 6 นาที จากนั้นวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ 734 nm นำค่าที่ได้ไปคำนวณหา % inhibition หรือการยับยั้งอนุมูลอิสระดังสมการที่ (3.1) จากนั้นนำค่าที่ได้ไปวิเคราะห์ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระของสาหร่ายเตาที่สภาวะต่างๆ เทียบกับความเข้มข้นของสารต้านอนุมูลอิสระมาตรฐาน Trolox ซึ่งเป็นอนุพันธ์ของวิตามินอี หรือเรียกว่าค่า TECA (Trolox Equivalent Antioxidant Capacity) รายงานผลความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ ABTS (mg TEAC/100 g dry matter)

$$\%inhibition = [(A_{734 \text{ control}} - A_{734 \text{ test sample}}) / A_{734 \text{ control}}] \times 100$$

เมื่อ $A_{734 \text{ control}}$ คือ ค่าการดูดกลืนแสงของชุดควบคุม

$A_{734 \text{ test sample}}$ คือ ค่าการดูดกลืนแสงของตัวอย่างทดสอบ

■ วิธี (DPPH) radical scavenging activity

วิธี DPPH radical scavenging ได้ดัดแปลงมาจาก Hou และคณะ (2001) ดังนี้ ทำการเจือจาง DPPH radical ด้วยเอทานอลให้ค่าดูดกลืนแสงที่ 517 นาโนเมตรเท่ากับ 1.40 ± 0.05 นำตัวอย่างเนื้อปลั้บอบแห้ง ที่ผ่านการบดจำนวน 0.5 กรัมละลายในน้ำกลั่นที่ปริมาตร 10 มิลลิลิตรผสมให้เป็นเนื้อเดียวกันจากนั้นนำไปปั่นเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 2,500 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 10 นาทีแล้วดูดตัวอย่างสารสกัดเนื้อปลั้บอบแห้ง ที่ความเข้มข้น 0.1 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตรที่ปริมาตร 0.6 มิลลิลิตรลงในหลอดทดลอง เติมสาร 1 M Tris-HCl buffer (pH เท่ากับ 7.9) ปริมาตร 0.2 มิลลิลิตร และเติม 5 มิลลิกรัม ของ DPPH ในเอทานอลปริมาตร 1.2 มิลลิลิตรผสมให้เข้ากัน ทิ้งไว้ในที่มืด 20 นาทีวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 517 นาโนเมตรนำค่าที่ได้ไปคำนวณหา % inhibition จากนั้น

นำค่าที่ได้ไปวิเคราะห์ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระของตัวอย่างเนื้อปลั้บอบแห้ง โดยเทียบกับกราฟมาตรฐานของ Trolox รายงานผลความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ DPPH (mg TEAC/100 g_{dry matter})

3.4 การศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสม

การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในกระบวนการอบแห้งปลั้บโดยศึกษาผลของปัจจัยต้น ได้แก่ อุณหภูมิ ความเร็วลม และความเข้มข้นของสารป้องกันการเกิดสีน้ำตาล ต่อสมบัติทางเคมี-กายภาพ จากนั้นออกแบบการทดลองแบบพหุคูณตอบสนอง ซึ่งทั้งสามปัจจัยสำหรับการศึกษาในครั้งนี้จะระบุเป็น X_1 , X_2 และ X_3 ตามลำดับ และกำหนดเป็นสามระดับ -1, 0 และ +1 ดังแสดงรายละเอียดของปัจจัยที่ใช้ในการออกแบบการทดลองในตาราง 3 ซึ่งค่าเหล่านี้ได้จากการทดลองเบื้องต้น (preliminary tests) และตัวแปรตามที่ต้องการศึกษา ได้แก่ สารประกอบฟีนอลิกรวม (Y_1) การวิเคราะห์ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ DPPH (Y_2) และการวิเคราะห์ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ ABTS (Y_3) ในการออกแบบการทดลองพหุคูณตอบสนองนั้นมี 2 แบบ ที่นิยมใช้ได้แก่ Box-Behnken Design (BBD) และ Central Composite Design (CCD) ซึ่งโครงงานวิจัยนี้ใช้วิธีการออกแบบการทดลองแบบ BBD โดยมีสมการพหุนามลำดับที่สองถูกนำมาใช้เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยทั้งสามและการตอบสนอง (Y)

ตารางที่ 3.1 ค่าปัจจัยที่ใช้ในการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม

ปัจจัยที่ต้องการศึกษา	ตัวแปร	ระดับความสำคัญ		
		-1	0	+1
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	X_1	45	55	65
ความเร็วลม	X_2	0.32	0.54	0.81
ความเข้มข้นของสารป้องกันการเกิดสีน้ำตาล	X_3	500	1000	1500

ตารางที่ 3.2 การออกแบบการทดลองแบบ Box-Behken Design เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม

อุณหภูมิ X ₁	ความเร็วลม X ₂	ความเข้มข้น		DPPH radical	ABTS radical
		ของสาร	ปริมาณฟีนอล ลิค		
		ป้องกันการ			
		เกิดสีน้ำตาล			
		X ₃			
-1	-1	0			
1	-1	0			
-1	1	0			
1	1	0			
-1	0	-1			
1	0	-1			
-1	0	1			
1	0	1			
0	-1	-1			
0	1	-1			
0	-1	1			
0	1	1			
0	0	0			
0	0	0			
0	0	0			
0	0	0			
0	0	0			
0	0	0			

โดยที่ Y คือค่าทำนายการตอบสนอง β_0 เป็นค่าคงที่ X_1, X_2, X_3 เป็นตัวแปรอิสระ $\beta_1, \beta_2, \beta_3$ เป็นค่าสัมประสิทธิ์เชิงเส้น $\beta_{12}, \beta_{13}, \beta_{23}$ เป็นค่าสัมประสิทธิ์ระหว่างตัวแปร, $\beta_1^2, \beta_2^2, \beta_3^2$ เป็นค่าสัมประสิทธิ์กำลังสอง ซึ่งประสิทธิภาพของการทำนายผลตอบสนองที่ดีที่สุดโดยสมการพหุนามจะพิจารณาจากค่า R^2 สุดท้ายสมการทางคณิตศาสตร์นำมาใช้ทำนายสภาวะที่เหมาะสมของการแปรรูป

บทที่ 4

ผลการทดลองและการอภิปรายผล

4.1 ผลกระทบของอุณหภูมิ ความเร็วลม และความเข้มข้นของสารละลาย KMS ต่อสมบัติทางทัศนศาสตร์ในระบบสี CIE-L*a*b*

การศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมตัวอย่างเนื้อปลับแบ่งการศึกษาความเข้มข้นของการแช่สารละลาย KMS ที่ระดับความเข้มข้น 500, 1,000 และ 1,500 พีพีเอ็ม เป็นเวลา 10 นาทีจากนั้นดำเนินการอบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิที่ 45, 55 และ 65 องศาเซลเซียส และความเร็วลม (0.32, 0.54 และ 0.81 เมตรต่อวินาที) จนเนื้อปลับมีความชื้นสุดท้ายไม่เกิน 20 เปอร์เซ็นต์น้ำหนักเปียก เปรียบเทียบกับสีของเนื้อลูกปลับ ภาพ 3.5 แสดงภาพถ่ายปรากฏของเนื้อลูกปลับจากนั้นวัดค่าสีด้วยเครื่องวัดสีระบบ CIE-L*-a*-b* ในรูปแบบของค่าความสว่าง/ความมืด (L*) ค่าความเป็นสีแดง/สีเขียว (a*) ค่าความเป็นสีเหลือง/สีน้ำเงิน (b*) ด้วยเครื่องวัดสี

เนื่องจากโครงสร้างของเซลล์เนื้อลูกปลับเกิดการถูกทำลายด้วยความร้อนและเมื่อนำไปแช่สารละลาย KMS ที่มีความเข้มข้นสูงจะเกิดการแพร่เข้าสู่โครงสร้างของเซลล์เนื้อลูกปลับ ส่งผลให้เกิดอนุพันธ์ของสารซัลเฟอร์เกินกว่า 10 มิลลิกรัม ต่อเนื้อลูกปลับอบแห้ง 1 กิโลกรัม ดังนั้นการเตรียมเนื้อลูกปลับที่สภาวะการลวกที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส และแช่สารละลาย KMS ที่ความเข้มข้น 1,500 พีพีเอ็ม และสภาวะการเตรียมตัวอย่างเนื้อลูกปลับ ที่แช่สารละลาย KMS ที่ความเข้มข้น 1,500 พีพีเอ็ม เป็นสภาวะในการเตรียมที่ไม่เหมาะสมต่อการเตรียมเนื้อลูกปลับสำหรับการอบแห้ง เนื่องจากมีความเสี่ยงต่อการปนเปื้อนของอนุพันธ์ของสารซัลเฟอร์เกินมาตรฐานที่กำหนดจากนั้นนำลูกปลับอบแห้งที่ผ่านการเตรียมที่สภาวะต่างๆ มาบรรจุในถุงอลูมิเนียมฟอยด์ถุงละ 50 กรัม จากนั้นนำไปเก็บไว้ในตู้บ่มที่สภาวะ 35 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 วัน (ภาพ 4.1) จากนั้นนำเนื้อลูกปลับมาตรวจจำนวนเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมดที่หลงเหลือเปรียบเทียบกับมาตรฐานสินค้าการเกษตรและอาหารแห่งชาติ โดยอ้างอิงกับ (มกอช.9-2549) โดยใช้มาตรฐานผลิตภัณฑ์ลำไยเป็นแนวทางพื้นฐาน



ภาพ 4.1 เก็บเนื้อปลั้มหมาดที่สภาวะการเตรียมขั้นตอน เป็นเวลา 30 วัน และนำมาตรวจวัดสารตกค้าง

ผลการศึกษาเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมของการเตรียมขั้นต้นของเนื้อปลั้มหมาด ศึกษาการแพร่กระจาย KMS ที่ระดับความเข้มข้น 500-1500 พีพีเอ็ม ในขณะที่การแพร่กระจาย KMS ที่ความเข้มข้นเท่ากับ 500 พีพีเอ็ม ที่เวลาในการแพร่กระจาย 10 นาที นั้นมีค่า L^* -value เท่ากับ $20.4 \pm 3.14 - 30.1 \pm 5.49$ ที่อุณหภูมิ 45-65 และความเร็วลมที่ 0.32-0.81 เมตรวินาที โดยผลของอุณหภูมิและความเร็วลมที่เพิ่มขึ้นเป็นตัวเร่งอัตราการอบแห้งของเนื้อปลั้มหมาดส่งผลให้สีของเนื้อปลั้มหมาดมีความสว่างมากขึ้น สอดคล้องกับ a^* -value และ b^* -value มีแนวโน้มตรงกันข้าม เมื่ออุณหภูมิและความเร็วลมเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าความเป็นสีแดง (a^* -value) และค่าความเป็นสีเหลือง (b^* -value) ลดลง ทั้งนี้เกิดจากปฏิกิริยาสีตาลที่เกิดขึ้นในระหว่างการอบแห้ง

การแช่ในสารละลาย KMS ที่ระดับความเข้มข้น 1,000 และ 1,500 พีพีเอ็ม เป็นเวลา 10 นาที จากนั้นล้างด้วยน้ำอุ่นที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส มีลักษณะการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางทัศนศาสตร์ในระบบสี CIE- $L^*a^*b^*$ ในแนวโน้มเดียวกัน เนื่องจากแต่เมื่อเปรียบเทียบการแพร่กระจาย KMS ที่ความเข้มข้นเท่ากับ 1,000 และ 1,500 พีพีเอ็ม ที่เวลาในการแพร่กระจาย 10 นาที พบว่า สมบัติทางทัศนศาสตร์ในระบบสี CIE- $L^*a^*b^*$ นั้นมีค่าดีกว่าการแพร่กระจาย KMS ที่ความเข้มข้น 500 พีพีเอ็ม เนื่องจากสารละลาย KMS เป็นสารยับยั้งปฏิกิริยาออกซิเดชัน และปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลเนื่องจากการทำงานของเอนไซม์พีนอกเลส (PPO) แต่ความเข้มข้นที่น้อยเกินไปกว่าการยับยั้งการทำงานของปริมาณสารตั้งต้นของเอนไซม์พอลิฟีนอลออกซิเดสโมโนฟีนอลที่มีอยู่ในผิวของเนื้อปลั้มหมาด เมื่อพิจารณาสภาวะที่การอบแห้งที่เหมาะสม ที่อุณหภูมิอากาศร้อนเท่ากับ 55 องศาเซลเซียส และความเร็วลมอากาศเท่ากับ 0.54-0.60 เมตรต่อวินาที พบว่าค่าความสว่าง (L^* -value) ของกลุ่มตัวอย่างปลั้มหมาดที่แช่ในสารละลาย KMS ความเข้มข้นที่ 1,000 และ 1,500 พีพีเอ็ม มีค่า 33.4 ± 6.71 ถึง 34.3 ± 2.22 ซึ่งมีความมากกว่ากลุ่มตัวอย่างสารละลาย KMS ความเข้มข้นที่ 500 พีพีเอ็ม ที่มีค่าเท่ากับ 24.6 ± 4.32 มีค่าน้อยกว่ากลุ่มตัวอย่างปลั้มหมาดที่แช่ในสารละลาย KMS ความเข้มข้นที่ 1,000 และ 1,500 พีพีเอ็ม เท่ากับ 28.36 เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ 4.1 ผลกระทบของอุณหภูมิ ที่ 45, 55 และ 65 องศาเซลเซียส ที่ความเร็วลมคงที่ ที่ 0.32, , 0.54 และ 0.81 เมตรต่อวินาทีต่อคุณภาพของพลับพลาตั่วในสารละลาย KMS เข้มข้น 500 พีพีเอ็ม ต่อสมบัติทางทัศนศาสตร์ ในระบบสี CIE-L*a*b*

อุณหภูมิ	ความเร็วลม	L*-value	a*-value	b*-value
45	0.32	23.6±4.32	14.2±6.34	13.8±3.71
	0.54	20.4±3.14	16.6±6.34	14.6±2.67
	0.81	21.7±8.12	14.3±4.78	16.2±3.22
55	0.32	28.4±6.67	11.2±3.71	15.5±4.67
	0.54	24.6±4.32	10.7±2.84	15.1±3.82
	0.81	21.2±3.56	12.2±3.91	14.8±4.51
65	0.32	30.1±5.49	11.3±4.16	16.8±3.67
	0.54	30.7±6.37	11.6±2.81	17.1±4.34
	0.81	30.4±4.62	10.7±3.17	18.4±2.87

ตารางที่ 4.2 ผลกระทบของอุณหภูมิ ที่ 45, 55 และ 65 องศาเซลเซียส ที่ความเร็วลมคงที่ ที่ 0.32, , 0.54 และ 0.81 เมตรต่อวินาทีต่อคุณภาพของพลับพลาตั่วในสารละลาย KMS เข้มข้น 1,000 พีพีเอ็ม ต่อสมบัติทางทัศนศาสตร์ในระบบสี CIE-L*a*b*

อุณหภูมิ	ความเร็วลม	L*-value	a*-value	b*-value
45	0.32	28.6±6.34	12.6±3.21	18.8±2.41
	0.54	31.4±5.82	12.1±2.18	17.4±3.14
	0.81	30.6±3.14	12.3±2.17	18.4±4.15
55	0.32	33.7±5.81	10.7±3.14	18.8±2.82
	0.54	33.4±6.71	10.1±4.15	19.4±4.11
	0.81	34.5±4.14	10.9±2.24	19.1±2.84
65	0.32	35.6±5.49	10.1±3.17	21.4±2.42
	0.54	35.4±4.61	8.3±4.62	23.4±2.78
	0.81	33.5±6.21	9.5±3.34	23.9±3.92

ตารางที่ 4.3 ผลกระทบของอุณหภูมิ ที่ 45, 55 และ 65 องศาเซลเซียส) ที่ความเร็วลมคงที่ ที่ 0.32, , 0.54 และ 0.81 เมตรต่อวินาทีต่อคุณภาพของพลับพลาตแขในสารละลาย KMS เข้มข้น 1,500 พีพีเอ็ม ต่อสมบัติทางทัศนศาสตร์ในระบบสี CIE- $L^*a^*b^*$

อุณหภูมิ	ความเร็วลม	L*-value	a*-value	b*-value
45	0.32	31.7±3.64	10.4±2.21	25.8±4.61
	0.54	30.2±4.12	11.7±3.34	23.2±3.37
	0.81	31.2±3.34	11.2±4.22	24.2±2.25
55	0.32	30.2±2.84	9.7±3.38	26.7±3.87
	0.54	34.3±2.22	9.1±2.56	28.8±4.58
	0.81	29.2±2.67	9.8±4.54	30.2±2.47
65	0.32	32.4±4.35	8.3±4.22	32.7±4.82
	0.54	37.6±6.31	8.1±3.34	33.4±2.52
	0.81	35.8±8.62	8.4±2.87	33.6±4.16

ผลกระทบของความเข้มข้นสารละลาย KMS เข้มข้น 500 พีพีเอ็ม ต่อสมบัติทางทัศนศาสตร์ในระบบสี CIE- $L^*a^*b^*$ พบว่า มีค่าความสว่างเพิ่มขึ้น เมื่ออุณหภูมิ และความเร็วเพิ่มขึ้น แต่มีค่าความสีแดง-เขียว (a*-value) ที่เพิ่มมากขึ้น แต่มีค่าความสีเหลือง-น้ำเงิน (b*-value) ลดลง ในลักษณะที่เป็นสีส้มมากขึ้น

ผลกระทบของความเข้มข้นของสารละลาย KMS เข้มข้น 1,000 และ 1,500 พีพีเอ็ม มีแนวโน้มเดียวกัน ในลักษณะที่มีค่าความสว่าง (L*-value) และ ค่าความสีเหลือง-น้ำเงิน (b*-value) เพิ่มมากขึ้น โดยมีค่าความสว่าง (L*-value) เท่ากับ 28.6±6.34 ถึง 37.6±6.31 และมีค่า 17.4±3.14 ถึง 33.6±4.16 แต่ค่าความสีแดง-เขียว (a*-value) ลดลง มีค่าในช่วง 12.6±3.21 ถึง 8.3±4.62 ตามลำดับ อย่างไรก็ตามผลของความเข้มข้นของสารละลาย KMS มีผลต่อปริมาณซิลเฟอร์ที่ตกค้าง ดังนั้นเมื่อพิจารณาปัจจัยที่เกี่ยวข้องของอุณหภูมิ ความเร็วลม และความเข้มข้นของสารละลาย KMS ต่ออัตราการอบแห้ง ค่าพลังงานจำเพาะ และสมบัติทางทัศนศาสตร์ในระบบสี CIE- $L^*a^*b^*$ สามารถกำหนดสภาวะที่เหมาะสมที่การอบแห้งที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส ที่ระดับความเร็วลมที่ 0.54 เมตรต่อวินาที โดยแขในสารละลาย KMS ความเข้มข้น 1,000 พีพีเอ็ม โดยมีสมบัติทางทัศนศาสตร์ในระบบสี CIE- $L^*a^*b^*$ ที่เหมาะสม มีค่าพลังงานจำเพาะในการอบแห้งเท่ากับ 0.42±0.011 กิโลจูล/ กิโลกรัมน้ำ

การหาสภาวะที่เหมาะสมด้วยวิธีการพื้นผิวตอบสนอง (response surface methodology, RSM) ด้วยการออกแบบการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน (Box-Behnken design, BBD) เป็นวิธีหนึ่งที่น่าสนใจเพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของเงื่อนไขกระบวนการผลิตและเงื่อนไขในการผลิตที่เหมาะสม สมเกียรติ และ ภูมินทร์ (2554)

นอกจากนี้การวิเคราะห์ด้วยวิธีการพื้นผิวตอบสนองสามารถทำให้ได้สมการทำนายสภาวะการอบแห้งที่เหมาะสมเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้งต่อสารประกอบฟีนอลิก และกิจกรรมต้านอนุมูลอิสระ (DPPH และ ABTS) โดยทั้งมีรูปแบบในสมการโพลีโนเมียลลำดับที่สองและค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยสำหรับค่าการตอบสนองของปริมาณสารประกอบฟีนอลิก และเปอร์เซ็นต์กิจกรรมต้านอนุมูลอิสระ โดยมีรูปแบบสมการตามที่แสดงในตารางที่ 4.5 สภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้ง ต่อสารประกอบฟีนอลิก และกิจกรรมต้านอนุมูลอิสระ (DPPH และ ABTS) ในการอบแห้งในการศึกษาด้วยเทคนิคการแบบทดลองแบบบล็อกซ์-เบ้ห์นเคน พบว่ามีช่วงอุณหภูมิที่ 45 – 65 องศาเซลเซียส ความเร็วลมเท่ากับ 0.32-0.81 เมตรต่อวินาที โดยใช้ความเข้มข้นของสารละลาย KMS ที่ความเข้มข้น 500 ถึง 1500 พีพีเอ็ม ดังนั้นเมื่อนำสภาวะที่เหมาะสมด้วยวิธีการวิเคราะห์ด้วยอัตราการอบแห้ง ค่าพลังงานจำเพาะ และสมบัติทางทัศนศาสตร์ในระบบสี CIE- $L^*a^*b^*$ และการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการแบบทดลองแบบบล็อกซ์-เบ้ห์นเคน เพื่อพิจารณาต่อปริมาณสารประกอบฟีนอลิก และกิจกรรมต้านอนุมูลอิสระ (DPPH และ ABTS)

4.2. ผลการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้งปลั๊กแห้งด้วยใช้วิธีพื้นผิวตอบสนอง

การดำเนินโครงการวิจัยในระยะที่ 1 ได้ดำเนินการศึกษาปัจจัยของการอบแห้งต่อความคงเหลือของปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ และความสามารถในการยับยั้งอนุมูลอิสระ (ABTS, DPPH) ของปลั๊กอบแห้งที่มีความชื้นสุดท้ายเท่ากับ 8.0 เปอร์เซ็นต์น้ำหนักเปียก ปัจจัยที่ใช้ในการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของการอบแห้งปลั๊กอบแห้งนั้นแบ่งเป็นการศึกษาค่าของอุณหภูมิในการอบแห้ง (TD) มีค่าอยู่ระหว่าง 45,55 และ 65 องศาเซลเซียส, และความเร็วลมร้อน (Air) อยู่ระหว่าง 0.32, 0.54 และ 0.81 m/s ซึ่งค่าปัจจัยที่ศึกษาเหล่านี้ได้ทำการศึกษาเบื้องต้น (preliminary) และค่าผลตอบสนองที่ต้องการศึกษา ได้แก่ ความ ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด (Y_1) ความสามารถในการยับยั้งอนุมูลอิสระ ABTS (Y_2) และความสามารถในการยับยั้งอนุมูลอิสระ DPPH (Y_3)

การทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมโดยวิธีพื้นผิวตอบสนอง (RSM) ร่วมกับการออกแบบการทดลองแบบบล็อกซ์-เบ้ห์นเคน (BBD) เป็นการรวบรวมเอาเทคนิคทั้งทางคณิตศาสตร์และทางสถิติที่มีประโยชน์ต่อการสร้างแบบจำลองและการวิเคราะห์ปัญหา งานวิจัยนี้ทำการออกแบบการทดลองสำหรับ 3 ปัจจัย อาศัยการทำการทดลองทั้งสิ้นจำนวน 15 การทดลองโดยเป็นการทดลองที่ตำแหน่งกึ่งกลางซึ่งทำซ้ำจำนวน 3 การทดลอง ผลการทดลองที่จะถูกนำไปวิเคราะห์ทางสถิติเพื่อหาความสมบูรณ์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับผลการทดลองการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้งปลั๊กอบแห้งด้วยลมร้อนโดยใช้วิธี RSM ด้วยการออกแบบการทดลองแบบ BBD เลือกระดับอุณหภูมิลมร้อน ขึ้นความหนา และความเร็วลมที่เหมาะสมในการอบแห้งปลั๊กอบแห้งที่มีปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด ความสามารถในการยับยั้งอนุมูลอิสระมีค่ามากที่สุด ผลการวิเคราะห์ค่าการตอบสนองของปลั๊กอบแห้งอบแห้งที่ได้ในแต่ละสิ่งทดลอง จากการทดลองพบว่าปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด ความสามารถในการยับยั้งอนุมูลอิสระ ABTS และ DPPH มีค่าอยู่ระหว่าง 1,229.94-

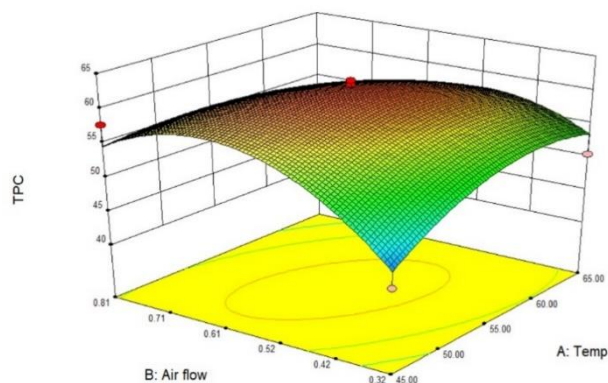
1,941.95 มิลลิกรัมกรดแกลลิกต่อ 100 กรัมน้ำหนักแห้ง ($\text{mg}_{\text{GAE}}/100 \text{ g}_{\text{DM}}$), 1,141.31-2,281.85 และ 1,665.10-3,784.02 มิลลิกรัมโพลีฟีนอลต่อ 100 กรัมน้ำหนักแห้ง ($\text{mg}_{\text{TEAC}}/100 \text{ g}_{\text{DM}}$) ตามลำดับ

การวิเคราะห์หา ส่วนผลการวิเคราะห์ค่าการตอบสนองของพลับอบแห้งอบแห้งได้ดำเนินการศึกษาปัจจัยของการอบแห้งต่อความคงเหลือของปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ และความสามารถในการยับยั้งอนุมูลอิสระ (ABTS, DPPH) ของพลับอบแห้งที่มีความชื้นสุดท้ายเท่ากับ 8.0 เปอร์เซ็นต์น้ำหนักเปียก ปัจจัยที่ใช้ในการศึกษาสถานะที่เหมาะสมของการอบแห้งพลับอบแห้งนั้นแบ่งเป็นการศึกษาค่าของอุณหภูมิในการอบแห้ง (X_1) มีค่าอยู่ระหว่าง 45, 55 และ 65 องศาเซลเซียส, เวลาในการลวกด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิคงที่ 95 องศาเซลเซียส (X_2) อยู่ระหว่าง 1.0, 2.0 และ 3.0 นาที และความเร็วลมร้อน (X_3) อยู่ระหว่าง 1, 1.5 และ 2 เมตรต่อวินาทีซึ่งค่าปัจจัยที่ศึกษาเหล่านี้ได้ทำการศึกษาเบื้องต้น (preliminary) และค่าผลตอบสนองที่ต้องการศึกษา ได้แก่ ความปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด (Y_1) ความสามารถในการยับยั้งอนุมูลอิสระ ABTS (Y_2) และความสามารถในการยับยั้งอนุมูลอิสระ DPPH (Y_3) เช่นเดียวกับการหาสถานะที่เหมาะสมของการอบแห้งพลับอบแห้งผลการทดลองพบว่าปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด ความสามารถในการยับยั้งอนุมูลอิสระ ABTS และ DPPH มีค่าอยู่ระหว่าง 391.94-890.69 มิลลิกรัมกรดแกลลิกต่อ 100 กรัมน้ำหนักแห้ง ($\text{mg}_{\text{GAE}}/100 \text{ g}_{\text{DM}}$), 217.80-435.45 และ 1,066.56-1,683.99 มิลลิกรัมโพลีฟีนอลต่อ 100 กรัมน้ำหนักแห้ง ($\text{mg}_{\text{TEAC}}/100 \text{ g}_{\text{DM}}$) ตามลำดับ

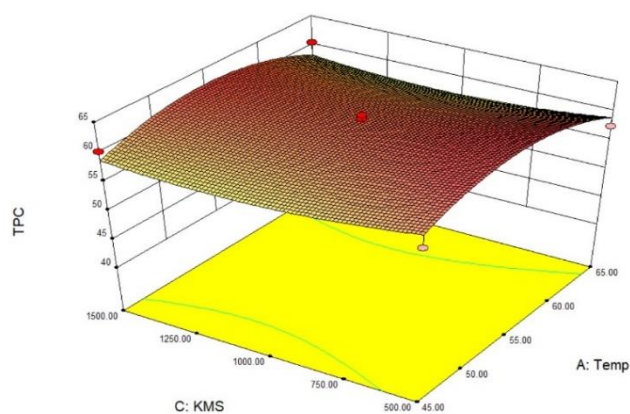
การวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ของปัจจัยที่ศึกษากับค่าการตอบสนองของปัจจัยซึ่งสามารถวิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้สมการการถดถอย (regression equation) ที่ระดับนัยสำคัญ α เท่ากับ 0.05 พบว่า แบบจำลองโพลีโนเมียลลำดับที่สอง (quadratic model) มีความเหมาะสมในการทำนายค่าการตอบสนองทุกค่าของการอบแห้งพลับอบแห้งด้วยลมร้อน ภาพ 4.5 และ 4.6 แสดงพื้นผิวตอบสนองในรูปแบบของกราฟ 3 มิติ (3D plot) และกราฟเส้นโครงร่างของพื้นผิวตอบสนอง (contour plot) ซึ่งแสดงถึงความสัมพันธ์ของปัจจัยระหว่างอุณหภูมิในการอบแห้ง และความเร็วลมร้อนต่อปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด (Y_1) และภาพ ภาพ 4.7 และ 4.8 กับภาพ 4.9 และ 4.10 แสดงรูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการยับยั้งอนุมูลอิสระ ABTS (Y_2) และความสามารถในการยับยั้งอนุมูลอิสระ DPPH (Y_3) ของพลับอบแห้งเช่นเดียวกับการวิเคราะห์การหาสถานะที่เหมาะสมของการอบแห้งพลับอบแห้ง แสดงพื้นผิวตอบสนองในรูปแบบของกราฟ 3 มิติ (3D plot) และกราฟเส้นโครงร่างของพื้นผิวตอบสนอง (contour plot) ซึ่งแสดงถึงความสัมพันธ์ของปัจจัยระหว่างอุณหภูมิในการอบแห้ง เวลาในการลวก และความเร็วลมร้อนต่อปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด (Y_1 รูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการยับยั้งอนุมูลอิสระ ABTS (Y_2) และความสามารถในการยับยั้งอนุมูลอิสระ DPPH (Y_3) ของพลับอบแห้งอบแห้ง

การวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ของปัจจัยที่ศึกษาต่อปริมาณสารประกอบฟีนอลิกฟีนอลิกทั้งหมด ความสามารถในการยับยั้งอนุมูลอิสระ ABTS และความสามารถในการยับยั้งอนุมูลอิสระ DPPH ของพลับพวงแห้ง จากการวิเคราะห์การถดถอยได้สมการความสัมพันธ์ดังแสดงในสมการที่ (4.1), (4.2) และ (4.3) โดยมีค่า R^2 เท่ากับ 0.9917, 0.9905 และ 0.9987

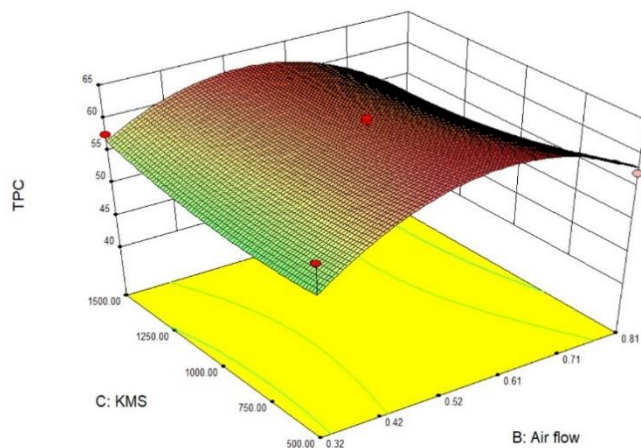
สมการที่ (4.4), (4.5) และ (4.6) สำหรับปริมาณสารประกอบฟีนอลิกฟีนอลิกทั้งหมด ความสามารถในการยับยั้งอนุมูลอิสระ ABTS และความสามารถในการยับยั้งอนุมูลอิสระ DPPH ของพลับพวงแห้งอบแห้งตามลำดับ โดยสามารถสร้างพื้นที่การตอบสนองได้ดังภาพ 4.54-4.57 โดยมีค่า R^2 เท่ากับ 0.9921, 0.9985 และ 0.8921 ตามลำดับเป็นการแสดงความสัมพันธ์ของปัจจัยต่อค่าผลค่าตอบสนองในรูปแบบของกราฟ 3 มิติ และกราฟโครงร่างของพื้นผิวตอบสนอง พบว่า การอบแห้งที่มีอุณหภูมิสูงขึ้นมีผลทำให้ปริมาณฟีนอลิกทั้งหมดและความสามารถในการยับยั้งอนุมูลอิสระมีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ซึ่งอาจเกิดขึ้นจากปริมาณความร้อนที่สูงเกินไปจึงทำให้สารประกอบฟีนอลิกบางชนิดที่ไม่ทนความร้อนเกิดการสลายตัวในระหว่างการอบแห้ง และอุณหภูมิความร้อนสูงขึ้นมีผลต่อค่าความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระลดลงโดยอาจเกิดจากการสลายตัวของสารที่มีสมบัติในการต้านอนุมูลอิสระเนื่องจากการได้รับความร้อนที่สูงเกินไป ซึ่งจะเห็นว่าปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดและความสามารถในการยับยั้งอนุมูลอิสระมีแนวโน้มในทิศทางเดียวกัน เนื่องจากกลไกการเกิดปฏิกิริยาเป็นแบบเดียวกันโดยเป็นวิธีวัดสมบัติในการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนเดี่ยว ในขณะที่การลดความเร็วลมมีผลทำให้ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดและความสามารถในการยับยั้งอนุมูลอิสระลดลงด้วย ซึ่งอาจเกิดมาจากการกระบวนการอบแห้งที่ใช้ความเร็วลมร้อนต่ำส่งผลให้การถ่ายเทมวลความร้อนในระหว่างกระบวนการอบแห้งหรือใช้ระยะเวลาในการอบแห้งนานขึ้น ซึ่งอาจส่งผลทำให้พลับพวงแห้งสัมผัสกับอากาศร้อนเป็นเวลานานขึ้นจึงเกิดการสูญเสียสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดที่มีฤทธิ์ในการยับยั้งอนุมูลอิสระได้เช่นกัน และความหนาของชั้นวัสดุที่เพิ่มขึ้นส่งผลต่อปริมาณฟีนอลิกทั้งหมดและความสามารถในการยับยั้งอนุมูลอิสระอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p -value<0.01) ซึ่งมีเหตุผลเดียวกับการลดความเร็วลมในการอบแห้ง ส่วนเวลาที่ใช้ในการลวกมีผลต่อปริมาณฟีนอลิกทั้งหมดและความสามารถในการยับยั้งอนุมูลอิสระของพลับพวงแห้งอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p -value<0.01) ทั้งนี้การลวกที่ใช้เวลาน้อยหรือมากเกินไปทำให้ตัวอย่างพลับพวงแห้งที่นำมาอบแห้งมีปริมาณฟีนอลิกที่มีฤทธิ์ในการยับยั้งอนุมูลอิสระลดลงด้วย อันเนื่องมาจากการเตรียมตัวอย่างด้วยการลวกที่ใช้เวลาน้อยเกินไปทำให้บางส่วนของพลับพวงแห้งยังไม่ได้สัมผัสกับไอน้ำหรือไม่ผ่านการลวก ในขณะที่การใช้เวลาในการลวกนานเกินไปทำให้ตัวอย่างพลับพวงแห้งเสียสภาพจึงส่งผลให้ตัวอย่างมีความชื้นสูง



(ก)

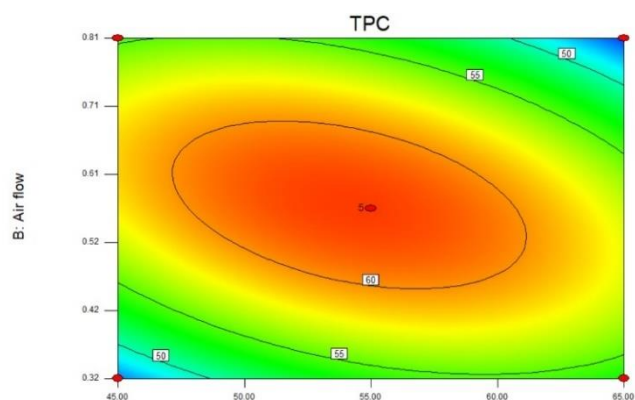


(ข)



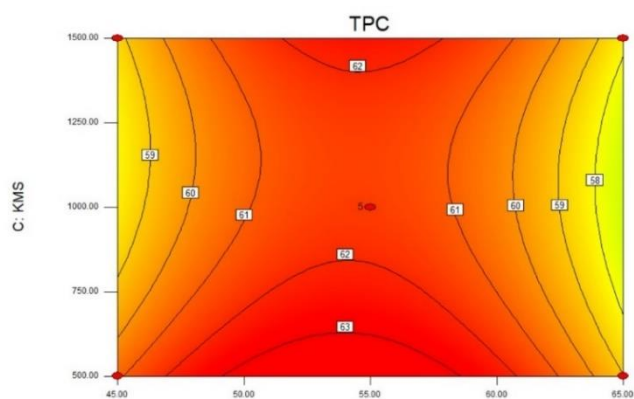
(ค)

ภาพ 4.2 กราฟ 3 มิติของพื้นผิวตอบสนองต่อปริมาณสารประกอบฟีนอลิก (Phenolic compounds); (ก) ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับความเร็วลม, (ข) ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลมและความเข้มข้นของ KMS, (ค) ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับความเข้มข้นของ KMS

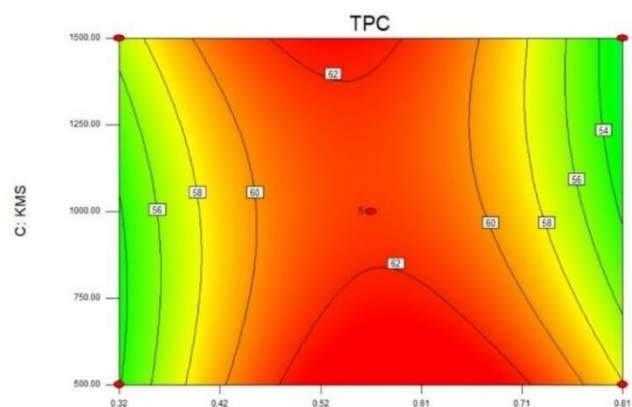


A: Temp

(ก)

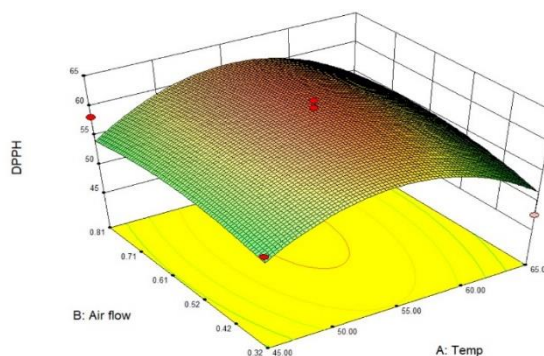


(ข)

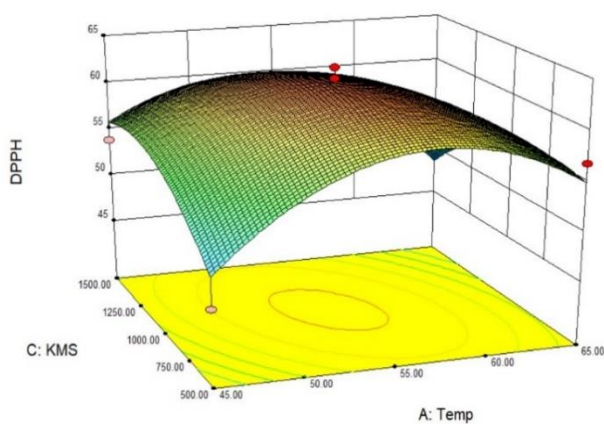


(ค)

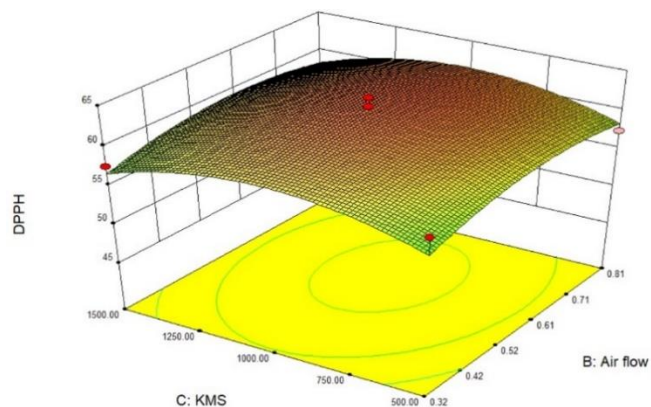
ภาพ 4.3 กราฟโครงสร้างของพื้นผิวตอบสนองต่อปริมาณสารประกอบฟีนอลิก (Phenolic compounds); (ก) ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับความเร็วลม, (ข) ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลมและความเข้มข้นของ KMS , (ค) ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับและความเข้มข้นของ KMS



(ก)

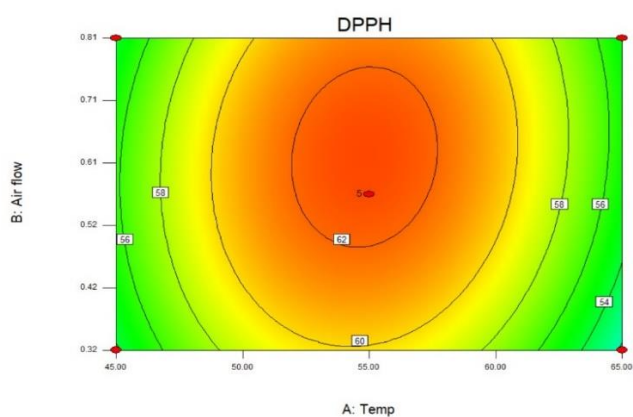


(ข)

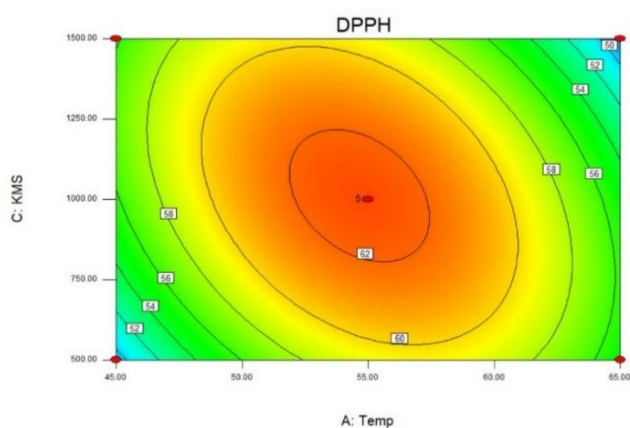


(ค)

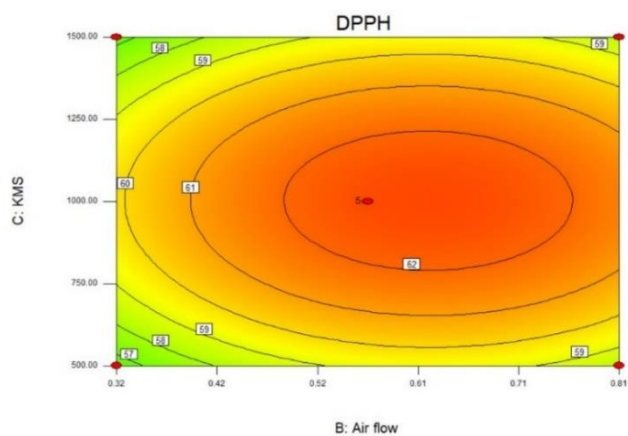
ภาพ 4.4 กราฟ 3 มิติของพื้นผิวตอบสนองต่อกิจกรรมต้านอนุมูลอิสระ (DPPH) ; (ก) ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับความเร็วลม, (ข) ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลมและความเข้มข้นของ KMS , (ค) ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับและความเข้มข้นของ KMS



(ก)

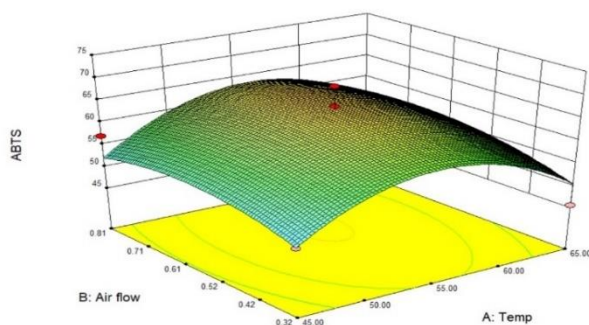


(ข)

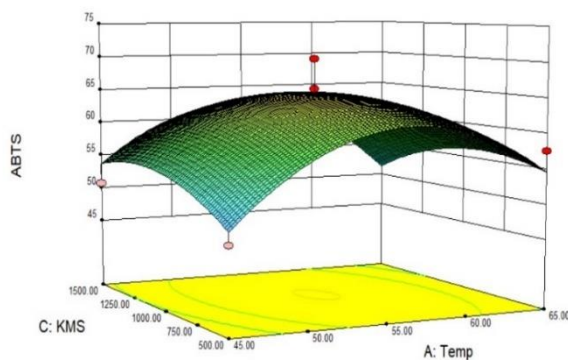


(ค)

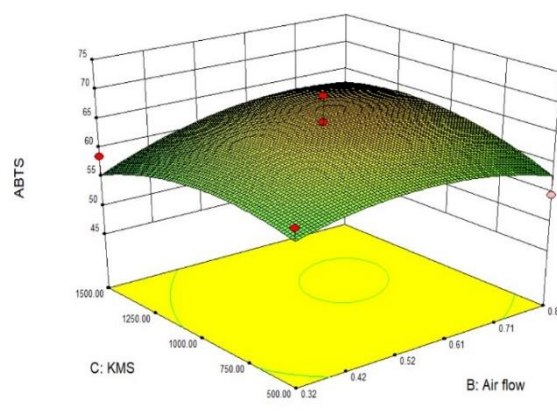
ภาพ 4.5 กราฟโครงสร้างของพื้นผิวตอบสนองต่อกิจกรรมต้านอนุมูลอิสระ (DPPH); (ก) ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับความเร็วลม, (ข) ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลมและความเข้มข้นของ KMS, (ค) ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและความเข้มข้นของ KMS



(ก)

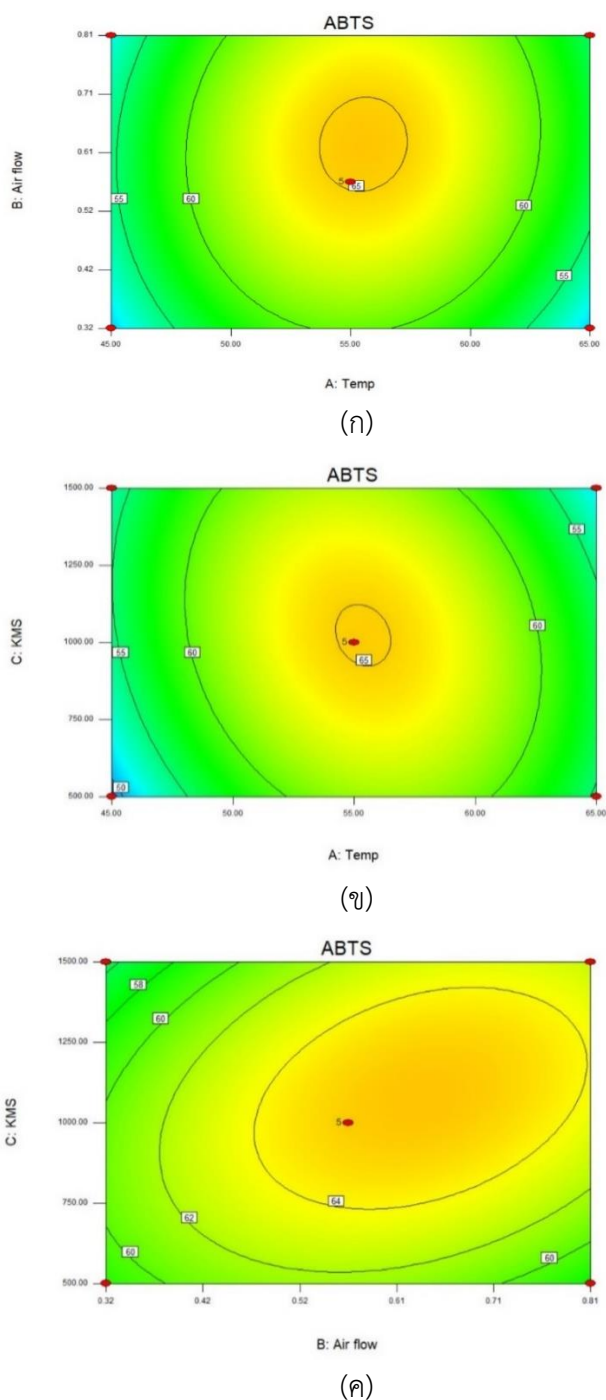


(ข)



(ค)

ภาพ 4.6 กราฟ 3 มิติของพื้นผิวตอบสนองต่อกิจกรรมด้านอนุมูลอิสระ (ABTS) ; (ก) ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับความเร็วลม, (ข) ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลมและความเข้มข้นของ KMS , (ค) ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับและความเข้มข้นของ KMS



ภาพ 4.7 กราฟโครงร่างของพื้นผิวตอบสนองต่อกิจกรรมต้านอนุมูลอิสระ (ABTS); (ก) ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับความเร็วลม, (ข) ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลมและความเข้มข้นของ KMS, (ค) ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับและความเข้มข้นของ KMS

จากผลการศึกษาพบว่า ปัจจัยของอุณหภูมิ ความเร็วลม และปริมาณความเข้มข้นของสารละลาย KMS ต่อปริมาณสารประกอบฟีนอลิก (TPC) และความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ (ABTS และ DPPH) ในผลิตภัณฑ์เนื้อลูกพลับด้วยการอบกึ่งแห้ง เป็นค่าเป็นตัวบ่งชี้ที่สำคัญในการคุณภาพของผลิตภัณฑ์พลับอบกึ่งแห้ง (พลับหมาด) พบว่าการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของปัจจัยที่ต้องการศึกษากับค่าการตอบสนองของปัจจัย โดยใช้แบบจำลองการถดถอยที่ระดับนัยสำคัญ $\alpha=0.05$ พบว่าแบบจำลองในรูปแบบสมการกำลังสอง (quadratic) มีความเหมาะสมโดยพิจารณาจากค่า P -value ($P < 0.5$) ค่า lack of fit ($P \geq 0.05$) และค่าทางสถิติประกอบกัน เมื่อวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ของปัจจัยที่ศึกษา คืออุณหภูมิ ความเร็วลม และปริมาณความเข้มข้นของสารละลาย KMS กับค่าการตอบสนองของปัจจัยของปริมาณสารประกอบฟีนอลิก (TPC) สามารถแสดงเป็นกราฟสามมิติดังภาพที่ 4.2(ก - ค) และภาพที่ 4.3(ก - ค), ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ (DPPH) สามารถแสดงเป็นกราฟสามมิติดังภาพที่ 4.4(ก - ค) และภาพที่ 4.5(ก - ค) และ ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ (ABTS) สามารถแสดงเป็นกราฟสามมิติดังภาพที่ 4.6(ก - ค) และภาพที่ 4.7(ก - ค) ตามลำดับ แสดงกราฟพื้นผิว ซึ่งชี้ให้เห็นผลของระดับอุณหภูมิ ความเร็วลม และปริมาณความเข้มข้นของสารละลาย KMS ที่ใช้ในการแปรรูปต่อปริมาณไขมันที่หลงเหลืออยู่ ความสัมพันธ์ที่แท้จริงระหว่าง y และเซตของตัวแปรอิสระ ซึ่งตามปกติแล้วใช้ฟังก์ชันพหุนามที่มีกำลังต่ำๆ ที่อยู่ภายใต้อาณาเขตบางส่วนของตัวแปรอิสระ ถ้าแบบจำลองของผลตอบสนองมีความสัมพันธ์เป็นแบบเชิงเส้นกับตัวแปรอิสระ ฟังก์ชันที่จะใช้ในการประมาณความสัมพันธ์นี้ก็คือแบบจำลองกำลังสองซึ่งมีรูปแบบดังนี้ สมการที่ (4.1)

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \varepsilon \quad (4.1)$$

เมื่อ $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_x$ คือ ค่าสัมประสิทธิ์ x_i คือตัวแปรอิสระ ส่วนค่า ε คือค่าความผิดพลาดของแบบจำลอง ในการวิเคราะห์แบบจำลองนี้ กำหนดให้ค่าความผิดพลาดของแบบจำลองมีค่าน้อยมาก และไม่นำมาคำนวณในจำลองสถานะที่เหมาะสม ค่าสัมประสิทธิ์ต่างๆ แสดงในตารางที่ 4.5 และสามารถเขียนในรูปแบบสมการกำลังสอง แสดงการกำหนดช่วงของแต่ละปัจจัยกับค่าการตอบสนองที่นำมาใช้เพื่อหาสถานะที่เหมาะสมในการแปรรูปลำไยกรอบด้วยการทอดสุญญากาศ เมื่อนำช่วงของค่าการตอบสนองทุกค่ามาทำการหาสถานะที่เหมาะสม เพื่อหาค่าปัจจัยที่ให้ค่าการตอบสนองดีที่สุด การวิเคราะห์สามารถสรุปผลได้ว่าสถานะที่เหมาะสมที่สุดของการแปรรูปเนื้อลูกพลับอบกึ่งแห้ง (พลับหมาด)

การวิเคราะห์ค่าการตอบสนองของคุณภาพของผลิตภัณฑ์พลับกึ่งแห้งได้ในแต่ละสิ่งทดลอง จากการทดลองพบว่า สารประกอบฟีนอลิก (TPC) และความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ (ABTS และ DPPH) สูงสุดมีค่าอยู่ระหว่าง 60.87 ± 3.64 มิลลิกรัมแกลลิกต่อมิลลิกรัม และความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ (DPPH และ ABTS) เท่ากับ $63.20 \pm 4.52, 65.99 \pm 5.01$ ตามลำดับ

ตารางที่ 4.4 สมการโพลิโนเมียลลำดับที่สองและค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยสำหรับค่าการตอบสนองของที่
หลงเหลือของสภาวะที่เหมาะสมในการอบกึ่งแห้งลูกพลับ (พลับหมาด)

Response	Model	R^2
ปริมาณสารประกอบฟีนอลิก (Phenolic compounds)	$Y_1 = 61.60 - 0.57X_1 + 0.037X_2 - 0.71X_3 - 4.18X_1X_2 + 0.33X_1X_3 - 2.15X_2X_3 - 3.88X_1^2 - 7.80X_2^2 + 1.50X_3^2$	0.9827
กิจกรรมต้านอนุมูลอิสระ (DPPH)	$Y_2 = 62.48 - 0.41X_1 + 0.85X_2 - 0.038X_3 - 0.62X_1X_2 + 0.32X_1X_3 - 0.025X_2X_3 - 7.09X_1^2 - 1.77X_2^2 - 3.24X_3^2$	0.9111
กิจกรรมต้านอนุมูลอิสระ (ABTS)	$Y_3 = 65.10 + 0.81X_1 + 1.61X_2 + 0.37X_3 + 0.82X_1X_2 - 2.00X_1X_3 + 2.00X_2X_3 - 9.76X_1^2 - 3.21X_2^2 + 3.19X_3^2$	0.9635

บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

ผลการศึกษานี้เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมของการอบขึ้นพลั้บอบกึ่งแห้งด้วยเทคนิคพื้นผิวดตอบสนอง (response surface methodology, RSM) วางแผนการทดลองแบบ Central composite design (CCD) เพื่อศึกษาผลของตัวแปรต้น 3 ปัจจัย คือ อุณหภูมิลมร้อน 3 ระดับ คือ 45, 55 และ 65 องศาเซลเซียส ค่าความเร็วลม 3 ระดับ คือ 0.32, 0.54 และ 0.81 เมตรต่อวินาที และความเข้มข้นของสารป้องกันการเกิดสีน้ำตาล 3 ระดับ คือ 500, 1,000 และ 1,500 พีพีเอ็ม ต่อค่าคุณภาพที่นำมาศึกษา ได้แก่ สมบัติทางทัศนศาสตร์ในระบบสี CIE-L*a*b* สารประกอบฟีนอลิกรวม (Total phenolic content, TPC) และความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ วิธี Scavenging activity of DPPH radical และ ABTS radical ตามลำดับ ด้วยเทคนิควิเคราะห์แบบ บ็อกซ์-เบห์นเคน (Box-behnken design BBD) ผลการศึกษพบว่า สภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการผลิตเนื้อพลั้บอบกึ่งแห้งเครื่องอบแห้งระบบถาดหมุน คือสภาวะที่เหมาะสมในการอบกึ่งแห้ง (พลั้บอบ) ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ความเร็วลม 0.54 เมตรต่อวินาที โดยแซ้ในสารป้องกันการเกิดสีน้ำตาลที่ความเข้มข้นเท่ากับ 1,000 พีพีเอ็มสภาวะดังกล่าวมีอัตราการอบแห้ง 3.10 ± 0.87 กรัมน้ำต่อกรัมน้ำหนักแห้งต่อนาที่ โดยมีต่อสมบัติทางทัศนศาสตร์ในระบบสี CIE-L*a*b* เท่ากับ 33.6 ± 5.24 , 10.1 ± 2.42 และ 19.2 ± 3.11 ตามลำดับ ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของตัวแปรต้น (อุณหภูมิลมร้อน ความเร็วลม และความเข้มข้นของสารป้องกันการเกิดสีน้ำตาล) มีรูปแบบเป็นสมการพหุนามลำดับที่สองและค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยสำหรับค่าการตอบสนองของที่หลงเหลือของสภาวะที่เหมาะสมในการอบกึ่งแห้งลูกพลั้บ มีรายละเอียดดังนี้

ปริมาณสารประกอบฟีนอลิก (Phenolic compounds)	$Y_1 = 61.60 - 0.57X_1 + 0.037X_2 - 0.71X_3 - 4.18X_1X_2 + 0.33X_1X_3 - 2.15X_2X_3 - 3.88X_1^2 - 7.80X_2^2 + 1.50X_3^2$	($R^2 = 0.9827$)
กิจกรรมต้านอนุมูลอิสระ (DPPH)	$Y_2 = 62.48 - 0.41X_1 + 0.85X_2 - 0.038X_3 - 0.62X_1X_2 + 0.32X_1X_3 - 0.025X_2X_3 - 7.09X_1^2 - 1.77X_2^2 - 3.24X_3^2$	($R^2 = 0.9111$)
กิจกรรมต้านอนุมูลอิสระ (ABTS)	$Y_3 = 65.10 + 0.81X_1 + 1.61X_2 + 0.37X_3 + 0.82X_1X_2 - 2.00X_1X_3 + 2.00X_2X_3 - 9.76X_1^2 - 3.21X_2^2 + 3.19X_3^2$	($R^2 = 0.9635$)

ผลการวิเคราะห์สภาวะที่เหมาะสมในการแปรรูปต่อการรักษาคุณภาพทางเคมี พบว่าสภาวะดังกล่าวมีสารประกอบฟีนอลิก (TPC) และความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ (ABTS และ DPPH) สูงสุดมีค่าอยู่ระหว่าง 60.87 ± 3.64 มิลลิกรัมแกลลิกต่อมิลลิกรัม และความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ (DPPH และ ABTS) เท่ากับ 63.20 ± 4.52 และ 65.99 ± 5.01 ตามลำดับ ผลการดำเนินโครงการวิศวกรรมค้นพบสภาวะที่เหมาะสมในการปรับปรุงกระบวนการแปรรูป ผลิตภัณฑ์พลับกึ่งแห้งที่สีสวย และมีสารต้านอนุมูลอิสระปริมาณมาก

5.2 ข้อเสนอแนะ

ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมประสิทธิภาพเชิงความร้อน และสมรรถนะของเครื่องอบแห้ง รวมทั้งการหาสภาวะที่เหมาะสมของการใช้พลังงานจำเพาะในการอบแห้ง

เอกสารอ้างอิง

- Blum, C., & A. Roli (2003). Metaheuristics in combinatorial optimization: Overview and conceptual comparison. *ACM computing surveys* 35(3), 268-308.
- Cheftel, J. C. (1995). High-pressure, microbial inactivation and food preservation. *Food science and technology international* 1(2-3), 75-90.
- Del Valle, J.M., Aranguiz, V., & H. Leon (1998). Effects of blanching and calcium infiltration on PPO activity, texture, microstructure and kinetics of osmotic dehydration of apple tissue. *Food Research International* 31(8), 557-569.
- Fennema, O. R. (1996). *Food chemistry* (Vol. 76). CRC Press, 50-96.
- Hou, W. C., Lee, M. H., Chen, H. J., Liang, W. L., Han, C. H., Liu, Y. W., & Y. H., Lin (2001). Antioxidant activities of dioscorin, the storage protein of yam (*Dioscorea batatas* Decne) tuber. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 49(10), 4956-4960.
- Kumar S, Kumar D, Saroha K, Singh N and B Vashishta (2008). Antioxidant and free radical scavenging potential of *Citrullus colocynthis* (L.) Schrad methanolic fruit extract. *Acta Pharmaceut* 58(2): 215-220.
- Montgomery, D. C., Myers, R. H., Vining, G. G., & T. J. Robinson (2012). *Generalized linear models: with applications in engineering and the sciences*. John Wiley & Sons, 501-504.
- Price, K. V., Storn, R. M., & J. A. Lampinen (2005). The differential evolution algorithm. *Differential evolution: a practical approach to global optimization*, 37-134.
- Sapers, G. M., & R. L., Miller (1993). Control of enzymatic browning in pre-peeled potatoes by surface digestion. *Journal of food science* 58(5), 1076-1078.
- Storn R. & K. Price. (1997). a simple and efficient adaptive scheme for global optimization over continuous spaces. Technical Report TR-95-012, International Computer Science, Berkeley CA (11), 341-359.
- Sachindra, N. M., Airanthi, M. K., Hosokawa, W. A., M., & K. Miyashita (2010). Radical scavenging and singlet oxygen quenching activity of extracts from Indian seaweeds. *Journal of food science and technology* 47, 94-99.
- Waliszewski, K. N., Márquez, O., & V. T. Pardio (2009). Quantification and characterisation of polyphenol oxidase from vanilla bean. *Food Chemistry* 117(2), 196-203.
- จรูญ พุทธจรรยา และพหล ศักดิ์กะทัศน์ (2537). การศึกษาสายพันธุ์ลูกพลับที่เหมาะสม และกรรมวิธีการทำลูกพลับอบแห้งและลูกพลับอบแห้งเพื่อการค้า แหล่งที่มา http://webpac.library.mju.ac.th:8080/mm/fulltext/research/2550/charoon_putthajanya_2540.pdf, 2-96.

จริงแท้ ศิริพานิช (2541) สรีรวิทยาและเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยวผักและผลไม้. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ, 398 หน้า.

นิธิยา รัตนพานนท์ (2545). เคมีอาหาร. สำนักพิมพ์โอเดียนสโตร์, กรุงเทพมหานคร, 487 หน้า.

น้ำฝน ไชยลังกา, นักรบ นาคประสม และ ฤทธิชัย อัครวราชันย (2556). การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของการอบแห้งสาหร่ายเตาด้วยลมร้อนโดยใช้วิธีพื้นผิวตอบสนอง. วารสารสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย 21(2), 16-24.

พรทิพย์ กาศสุวรรณ และ กิตติชัย บรรจง (2561). การหาสภาวะที่เหมาะสมของการสกัดน้ำมันจากเมล็ดมะละกอด้วยไมโครเวฟช่วยสกัดโดยใช้วิธีพื้นผิวตอบสนอง. Journal of Science and Technology 10(20), 76-88.

พรรณทิพย์ แสงสุขเอี่ยม และราตรี ชูยิทธิ. (2558). การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการ สกัดสีย้อมจากกลีบดอกอัญชันโดยใช้วิธีพื้นผิวตอบสนอง. ในการประชุมวิชาการระดับชาติ ครั้งที่ 7 มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม (วิจัยสร้างนวัตกรรม เพื่อพัฒนาท้องถิ่นและสังคมไทย สู่ Disruptive Society) 30-31 มีนาคม 2558 ณ มหาลัยราชภัฏนครปฐม.

พิชิต โชตก และสุพิชญา คำคม (2563). การหาสภาวะที่เหมาะสมของการสกัดสำหรับเพิ่มสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ และฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระจากผลมะม่วงหาวมะนาวโห่ (Carissa carandas Linn.) โดยใช้วิธีพื้นผิวตอบสนอง วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา 25(2), 624-633.

ศิวาพร ศิวเวช (2535). วัตถุดิบในอาหาร. ศูนย์ส่งเสริมและฝึกอบรมการเกษตรแห่งชาติ. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์วิทยาเขตกำแพงแสน. นครปฐม.

สำนักงานมาตรฐานสินค้าเกษตรและอาหารแห่งชาติ (9-2549). แหล่งที่มา https://www.acfs.go.th/standard/download/dried_longan_for_process.pdf (สืบค้นเมื่อ 15 มิถุนายน 2566)

สำนักงานคณะกรรมการอาหารและยา (2547) คณะเภสัชศาสตร์มหาวิทยาลัยพะเยา. สำนักงานคณะกรรมการอาหารและยา. ตรวจสอบงานโครงการเพาะปลูกกล้วยเพื่อประโยชน์ทางการแพทย์ ของ คณะเภสัชศาสตร์มหาวิทยาลัยพะเยา.

สมเกียรติ ตั้งจิตสิตเจริญ และภูมินทร์ แจ่มเชื้อ (2554). การลดฟองอากาศในกระบวนการผลิตบรรจุภัณฑ์พลาสติกโดยการประยุกต์ใช้วิธีพื้นผิวผลตอบสนองแบบบ็อกซ์เบห์นเคน. การประชุมวิชาการชางานวิศวกรรมอุตสาหกรรม. หน้า 171-175.

อุดมเกียรติ พรธนประเทศ และรัชนี สวางคพัฒน์. (2532). บทบาทและปฏิกิริยาของสารซัลไฟต์ในอาหาร. วารสารกรมวิทยาศาสตร์การแพทย์ 31(1), 63-71.

38 ดอย 38 โครงการหลวง แหล่งที่มา <https://www.topchiangmai.com/royalproject/> (สืบค้นเมื่อวันที่ 15 มิถุนายน 2556)

ภาคผนวก ก.

การแปรรูปลูกพลับอบกิ่งแห้ง

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก



(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

ภาพ ก.1 การเตรียมแปรรูปลูกพลับ (ก) การทำความสะอาด (ข) การวัดขนาดลูกพลับ (ค) การหั่นลูกพลับ
(ง) การแช่สารป้องกันการเกิดสีน้ำตาล KMS



(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

ภาพ ก.2 การเตรียมแปรรูปลูกพลับในการแช่สารป้องกันการเกิดสีน้ำตาล KMS

- (ก) การนำพลับขึ้นชิ้นมาจากการแช่สาร KMS (ข) พลับขึ้นหลังการแช่สาร KMS (ค) การเรียงพลับขึ้นให้อยู่ในถาด
(ง) พลับขึ้นที่เตรียมความพร้อมเข้าเครื่องอบแห้ง



(ก)



(ข)

ภาพ ก.3 การเตรียมการเครื่องอบแห้ง

(ก) การตั้งอุณหภูมิและเวลาเครื่องอบแห้ง (ข) การนำพลับใส่ในเครื่องอบแห้ง



(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

ภาพ ก.4 การนวดผลไม้

(ก) อบลูกพลับครบ 8 ชั่วโมง (ข) การนำพลับออกมานวด (ค) การนำพลับออกตากแดด (ง) การนวดผลไม้



(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

ภาพ ก.5 การบรรจุกลับในบรรจุภัณฑ์

(ก) นำกลับออกมา (ข) กลับที่อบแห้งเสร็จ (ค) การบรรจุกลับอบแห้ง

(ง) การนำบรรจุภัณฑ์ใส่ในตู้แช่

ภาคผนวก ข.

การวิเคราะห์ปริมาณสารประกอบฟีนอลิก

และ กิจกรรมต้านอนุมูลอิสระ DPPH และ ABTS

ภาคผนวก

ภาคผนวก ข



(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

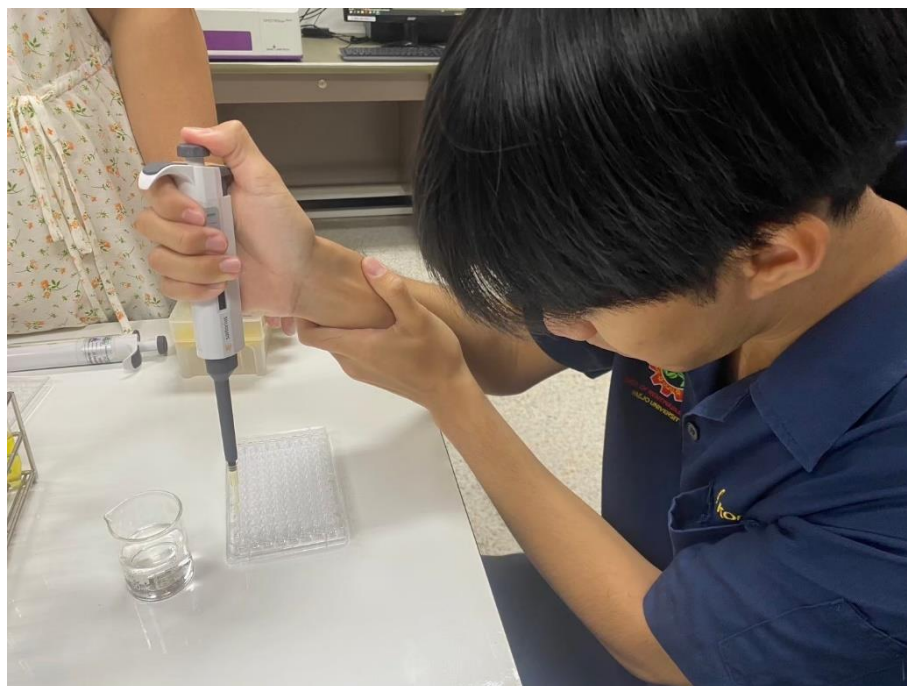
ภาพ ข.1 การตรวจกิจกรรมต้านอนุมูลอิสระ DPPH

(ก) ตัวทำละลายเมทานอล (ข) ตัวอย่างทดลอง (ค) หยอดตัวทำละลายเมทานอล 150 ไมโครลิตร

(ง) หยอดตัวอย่างทดลอง 50 ไมโครลิตร



(ก)



(ข)

ภาพ ข.2 การตรวจกิจกรรมต้านอนุมูลอิสระ ABTS

(ก) ดูดตัวอย่างทดลอง 50 ไมโครลิตร (ข) หยอดตัวทำละลายเมทานอล 150 ไมโครลิตร



(ก)



(ข)

ภาพ ข.3 การตรวจสอบสารประกอบฟีนอลิก

(ก) การใส่ Pipette Tip (ข) ดูดสารละลาย Folin-Ciocalteu reagent ความเข้มข้น 10% ที่ 100 ไมโครลิตร



(ก)



(ข)

ภาพ ข.4 การตรวจสอบประกอบฟีนอลิก

(ก) หยอดตัวอย่างทดลอง 20 ไมโครลิตร หลังจาก 3 – 5 นาที หยอดโซเดียมคาร์บอเนตความเข้มข้น 7.5% ที่ 80 ไมโครลิตร (ข) เก็บในที่มืดอุณหภูมิห้องเป็นเวลา 30 นาที



(ก)



(ข)

ภาพ ข.5 การวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง Spectrophotometer

(ก) การวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง Spectrophotometer ที่ 517 นาโนเมตร ของกิจกรรมต้านอนุมูล

อิสระ DPPH

(ข) การวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง Spectrophotometer ที่ 734 นาโนเมตร ของกิจกรรมต้านอนุมูล

อิสระ ABTS



(ก)

ภาพ ข.5 การวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง Spectrophotometer

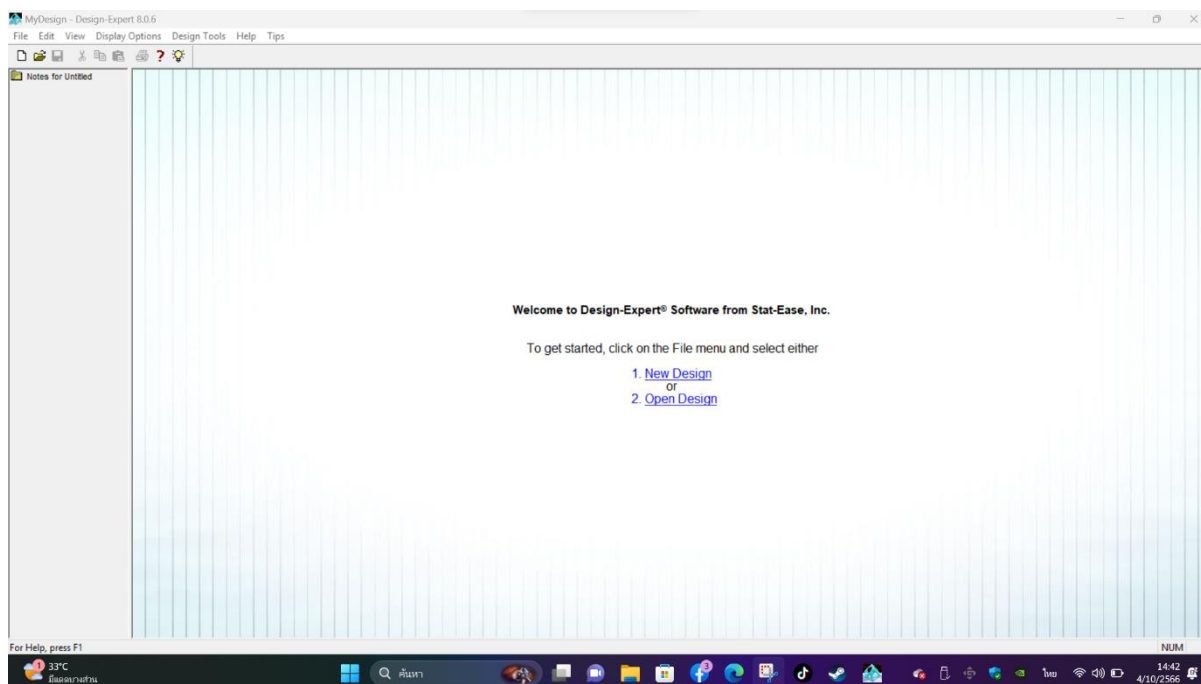
(ก) การวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง Spectrophotometer ของสารประกอบฟีนอลิกที่ 765 นาโนเมตร

ภาคผนวก ค.

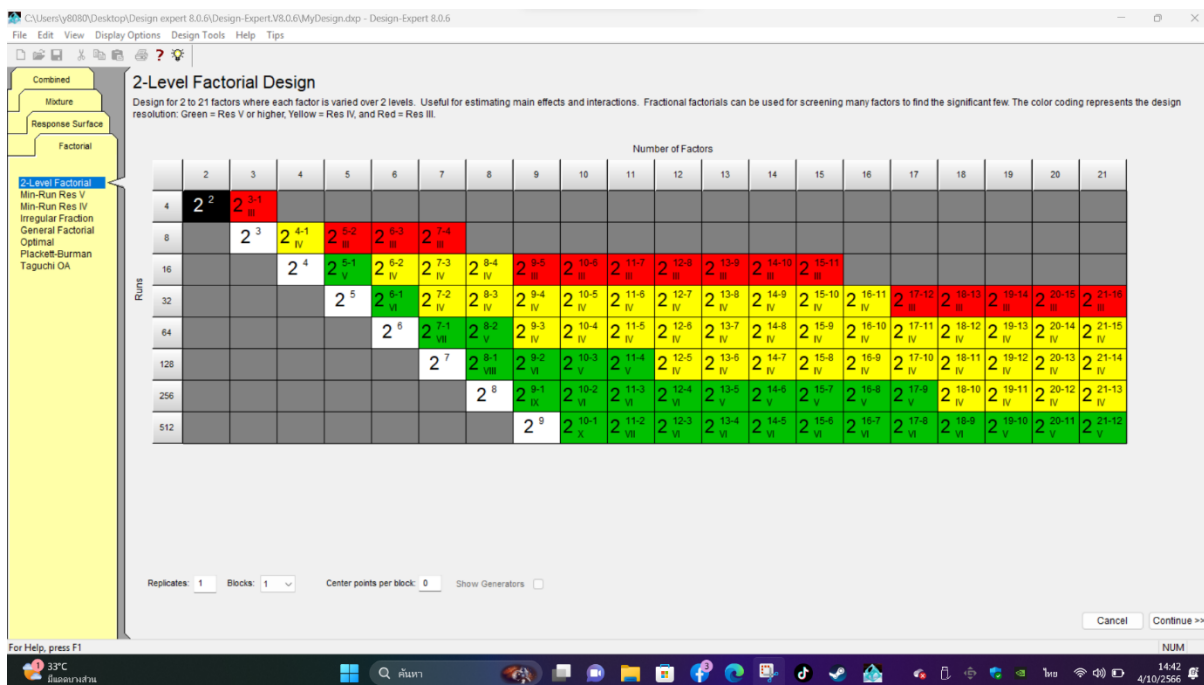
การใช้โปรแกรม Design expert ในการวิเคราะห์ response
surface methodology (RSM)

ภาคผนวก

ภาคผนวก ค

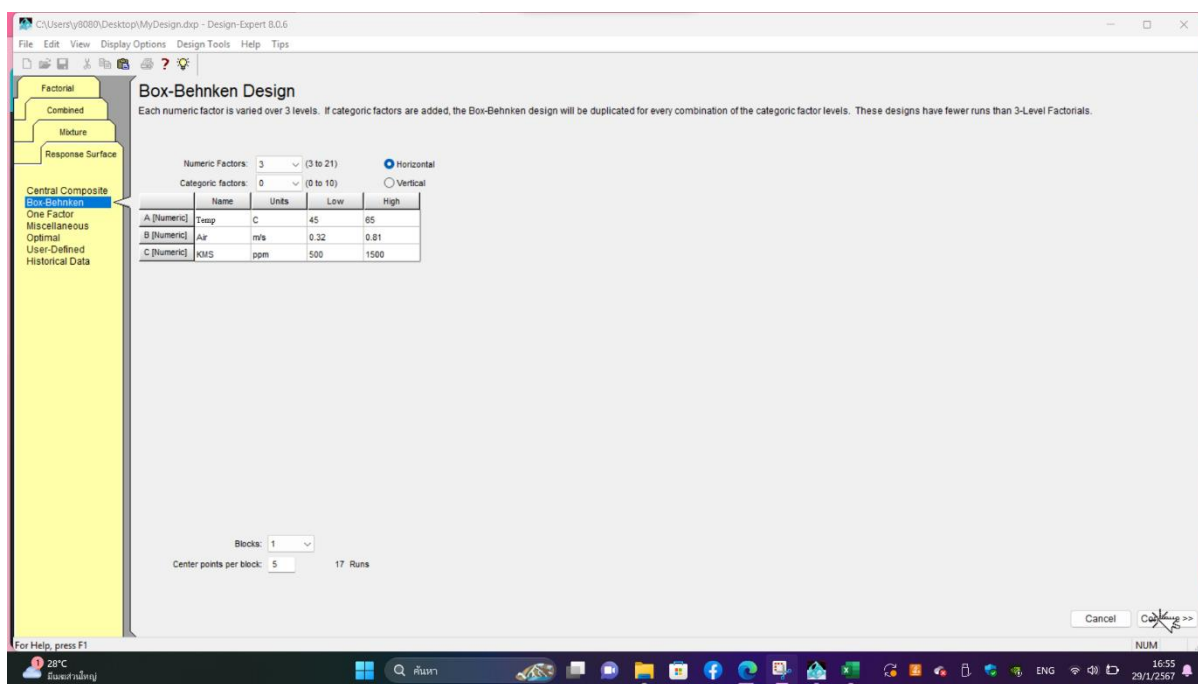


(ก)

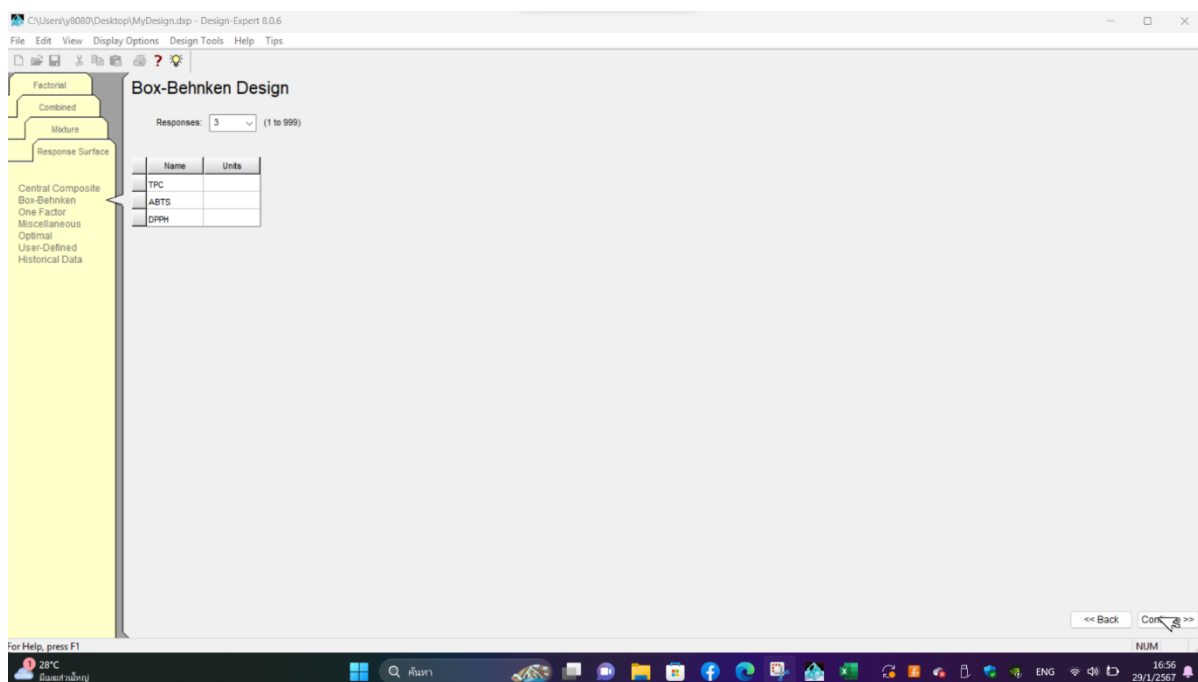


(ข)

ภาพ ค.1 (ก) การสร้างการทดลองเก็บตัวแปร (ข) การเลือก 2-Level Factorial Design



(ก)



(ข)

ภาพ ค.2 (ก) การใช้ Box-Behnken Design กำหนดตัวแปรต้น ได้แก่ Temp ,Air ,KMS
(ข) การใช้ Box-Behnken Design กำหนดตัวแปรตาม ได้แก่ Total phenolic และ ABTS ,DPPH

Design-Expert 8.0.6

File Edit View Display Options Design Tools Help Tips

is for persimom data

Design (Actual)

Summary

Graph Columns

Evaluation

Analysis

R1:TPC (Analyzed)

R2:ABTS

R3:DPPH

Optimization

Numerical

Graphical

Point Prediction

Confirmation

Std	Run	Factor 1 A:temp C	Factor 2 B:Air mls	Factor 3 C:KMS ppm	Response 1 TPC	Response 2 ABTS	Response 3 DPPH
1	12	45.00	0.32	1000.00	44.4	50.3	54.8
2	13	65.00	0.32	1000.00	50.5	45.5	47.7
3	9	45.00	0.81	1000.00	57.7	57.1	58.3
4	15	65.00	0.81	1000.00	47.5	55.6	53.7
5	11	45.00	0.57	500.00	58.7	47.2	46.2
6	6	65.00	0.57	500.00	57.6	57.6	56.8
7	2	45.00	0.57	1500.00	60.2	50.7	53.9
8	7	65.00	0.57	1500.00	60.4	53.1	51.7
9	8	55.00	0.32	500.00	58.4	60.7	58.7
10	5	55.00	0.81	500.00	57.2	54.7	57.4
11	14	55.00	0.32	1500.00	57.7	58.7	57.6
12	10	55.00	0.81	1500.00	47.9	60.7	56.2
13	4	55.00	0.57	1000.00	62.1	65.7	62.4
14	1	55.00	0.57	1000.00	61.4	70.1	62.1
15	17	55.00	0.57	1000.00	62.7	63.3	63.8
16	3	55.00	0.57	1000.00	60.5	61.8	61.4
17	16	55.00	0.57	1000.00	61.3	64.6	62.7

Design Layout

Run Sheet

Run Info Sheet

Top-Of View

press F1

(ก)

Design-Expert 8.0.6

File Edit View Display Options Design Tools Help Tips

is for persimom data

Design (Actual)

Summary

Graph Columns

Evaluation

Analysis

R1:TPC (Analyzed)

R2:ABTS

R3:DPPH

Optimization

Numerical

Graphical

Point Prediction

Confirmation

Transform

Fit Summary

f(x) Model

ANOVA

Diagnostics

Model Graphs

To analyze this response, click on the above icons in succession.

Transformation

None

Square Root

Natural Log

Base 10 Log

Inverse Sqrt

Inverse

Power

Logit

ArcSin Sqrt

Equation

None (lambda = 1.0)

$y' = y$

Use with a typical response.

Coding for Analysis: Coded

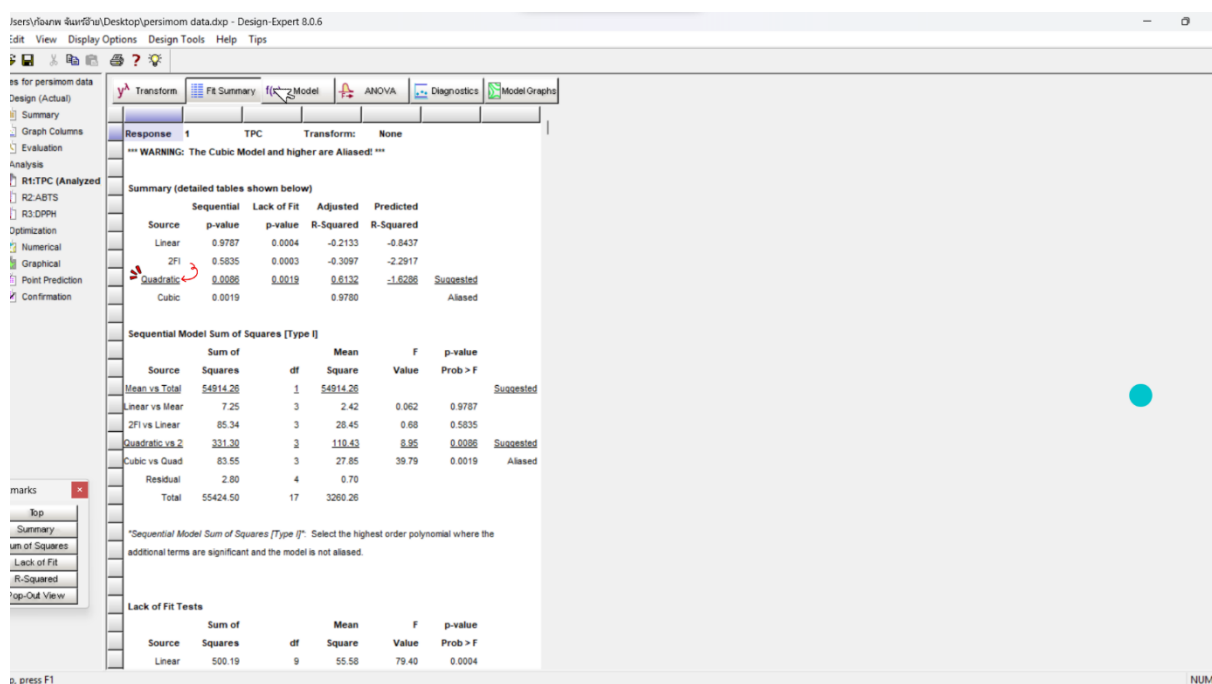
Response ranges from 44.4 to 62.7.
Ratio of max to min is 1.41216

A ratio greater than 10 usually indicates a transformation is required. For ratios less than 3 the power transforms have little effect.

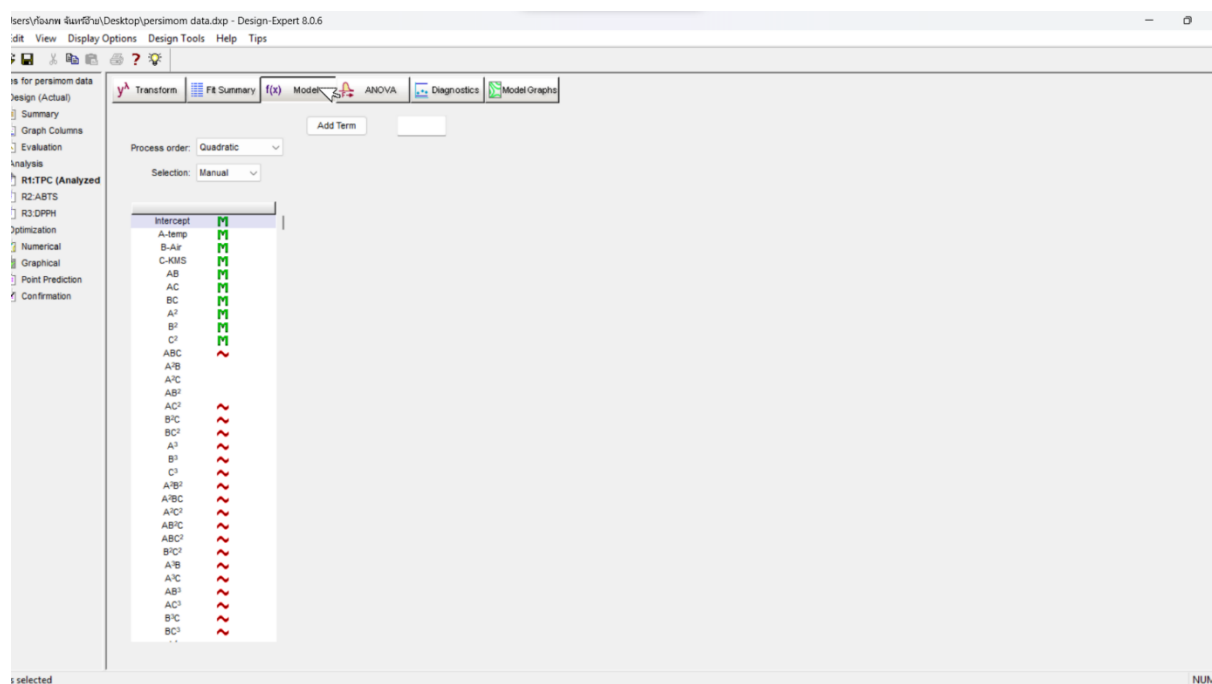
press F1

(ข)

ภาพ ค.3 (ก) การสร้างแผนการทดลอง Commission ตามข้อมูลการทดลอง
(ข) ขั้นตอนการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในหน้าต่าง Analysis Function Transform



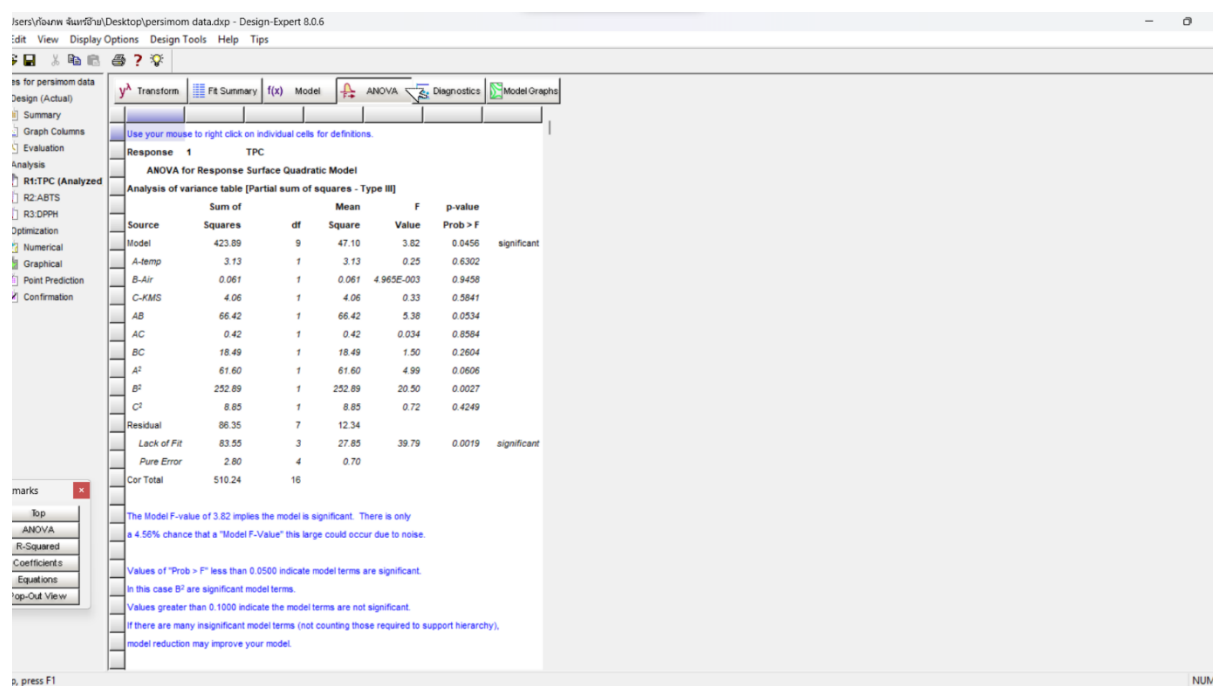
(ก)



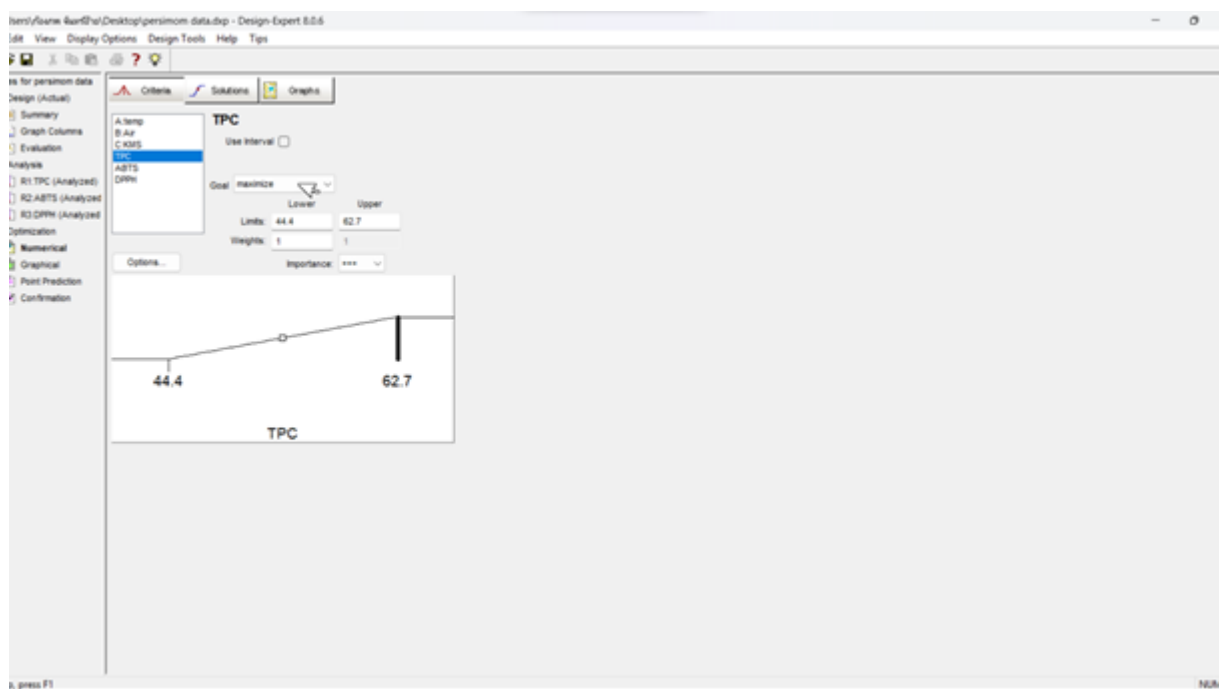
(ข)

ภาพ ค.4 (ก) การเลือก Function fit Summary และเลือกใช้รูปแบบสมการทางคณิตศาสตร์ Quadratic

(ข) การเลือก Function Model เป็นการแสดงค่าสัมประสิทธิ์จำพจน์



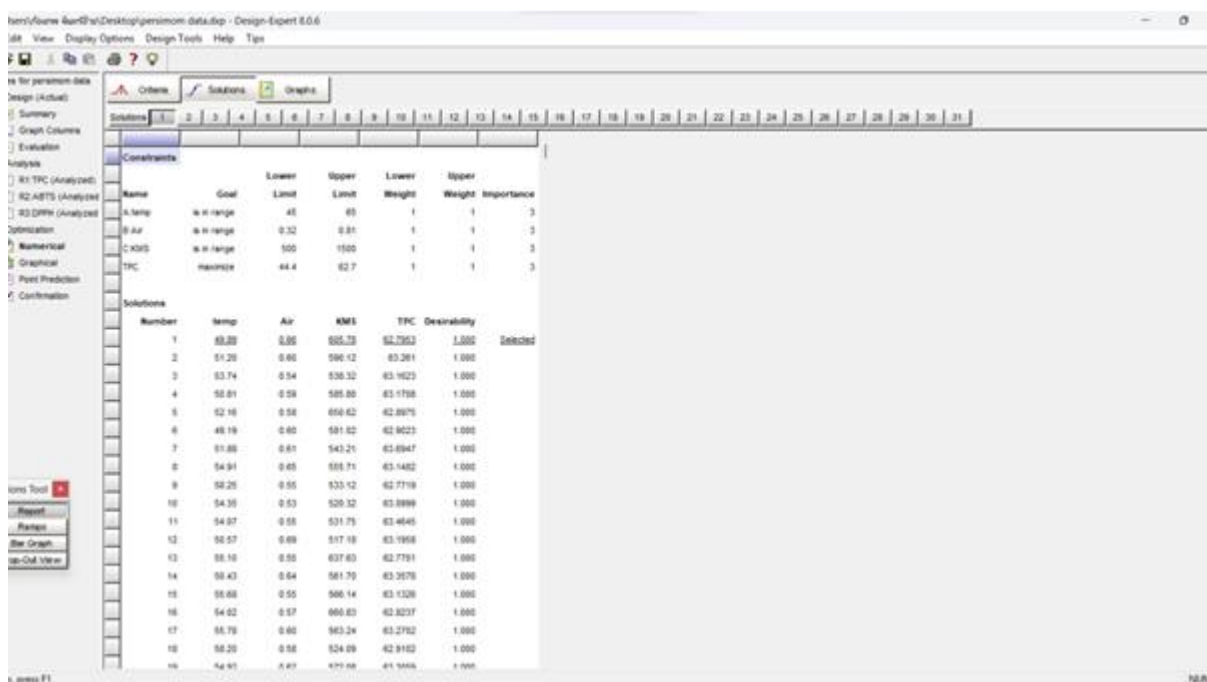
(ก)



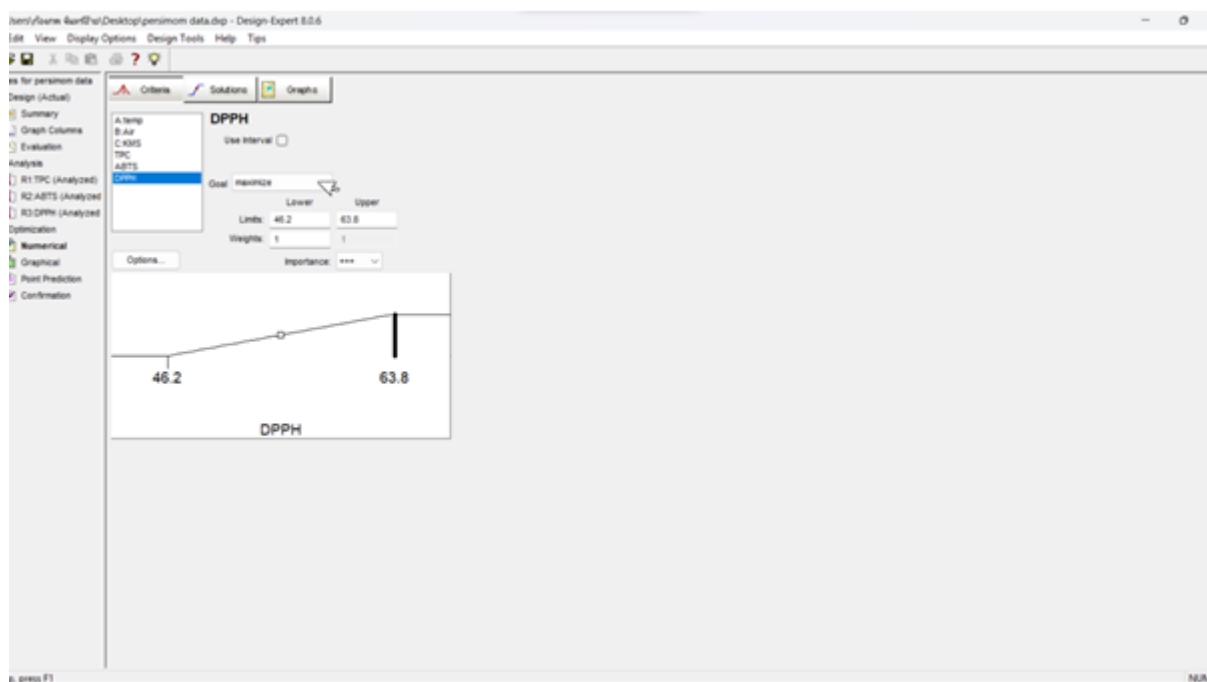
(ข)

ภาพ ค.5 (ก) เลือก Function Anova การวิเคราะห์ข้อมูล

(ข) การหาสถานะที่เหมาะสมของ Total phenolic โดย Function Optimization

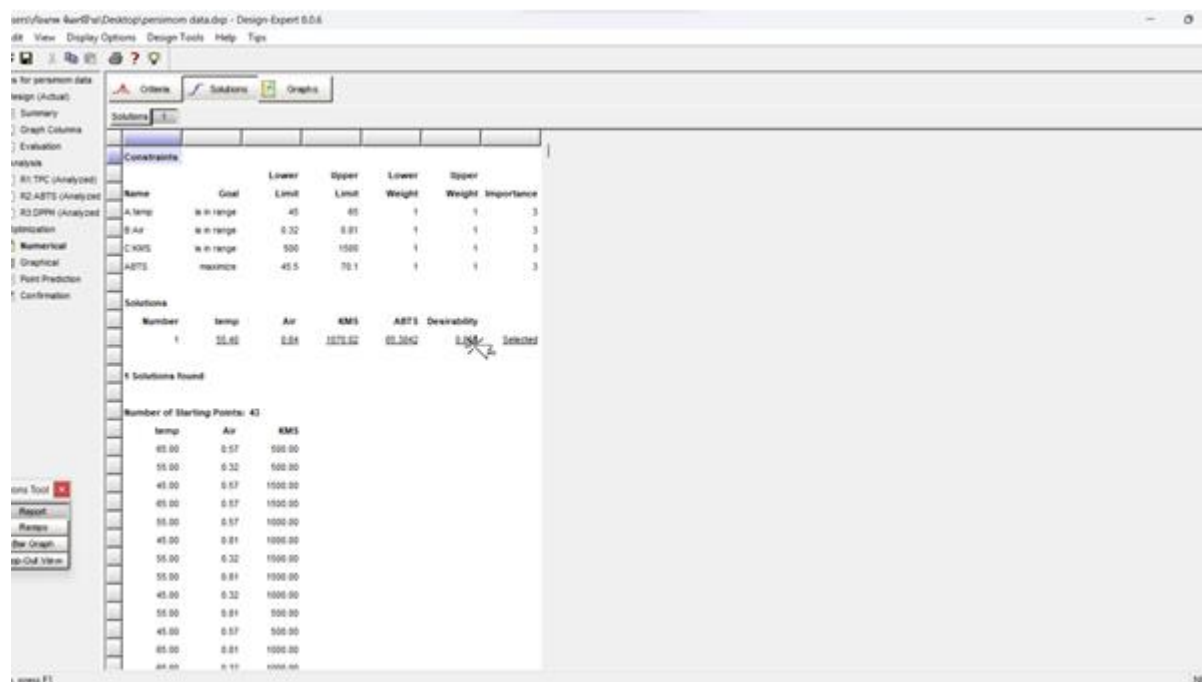


(ก)

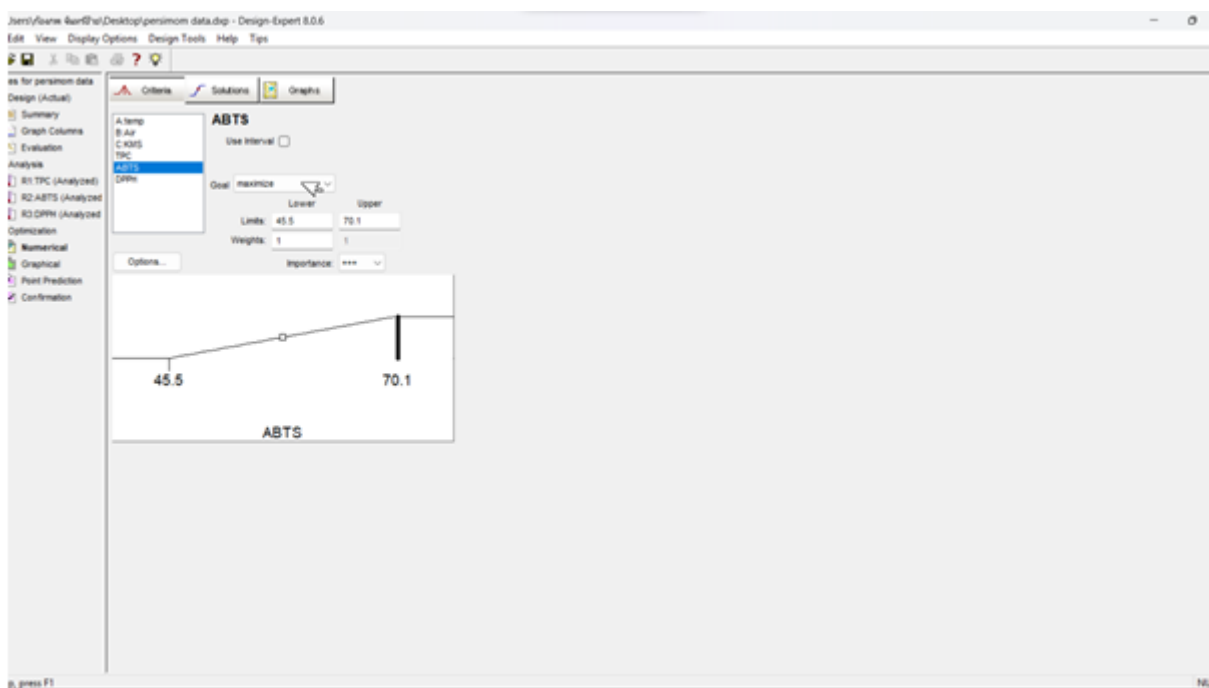


(ข)

ภาพ ค.6 (ก) เลือก Function Solutions ทำการวิเคราะห์ Numerical
(ข) การหาสภาวะที่เหมาะสมของ DPPH โดย Function Optimization



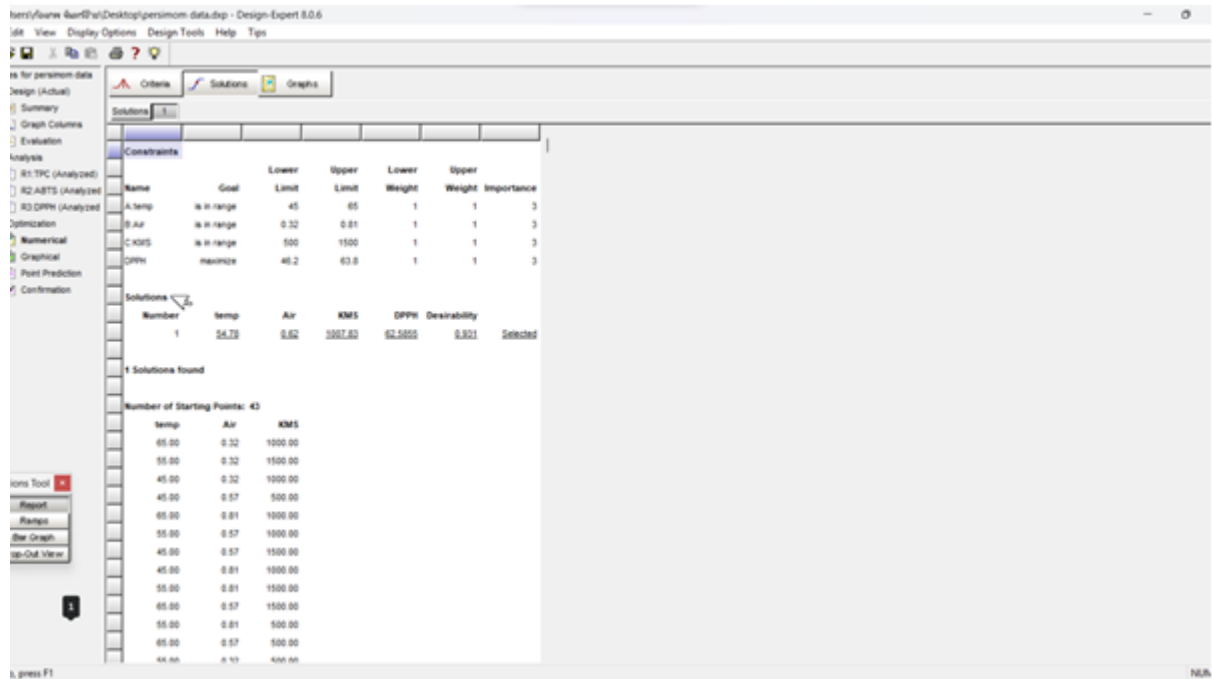
(ก)



(ข)

ภาพ ค.7 (ก) เลือก Function Solutions ทำการวิเคราะห์ Numerical

(ข) การหาสถานะที่เหมาะสมของ ABTS โดย Function Optimization



(ก)

ภาพ ค.8 (ก) เลือก Function Solutions ทำการวิเคราะห์ Numerical

ภาคผนวก ง.

การนำข้อมูลเชิงวิศวกรรมเพื่อนำไปใช้ในการพัฒนา

กระบวนการแปรรูปพลัมหมาด

ภาคผนวก

ภาคผนวก ง



(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

ภาพ ง.1 (ก) การเก็บพลับอบแห้ง (ข) การปฏิบัติงานกับชาวบ้าน (ค) การนวดพลับอบแห้ง (ง) พลัับพันธุ์ P2

ประวัติผู้ทำโครงการ

ชื่อ-สกุล นายกฤษดาภรณ์ พุทธวงศ์

รหัสนักศึกษา 6515125004

วัน เดือน ปี เกิด 4 ตุลาคม 2544

ประวัติการศึกษา



ระดับการศึกษา	สถาบันการศึกษา	ปีการศึกษา ที่สำเร็จการศึกษา
ประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง	วิทยาลัยเกษตรและเทคโนโลยีเชียงใหม่	2564
ประกาศนียบัตรวิชาชีพ	วิทยาลัยเกษตรและเทคโนโลยีเชียงใหม่	2562
มัธยมศึกษาตอนต้น	โรงเรียนกู่คำ	2559
ประถมศึกษา	โรงเรียนกู่คำ	2556

สถานที่ที่ติดต่อได้สะดวก

บ้านเลขที่ 193 หมู่ 7

ตำบล สันกลาง อำเภอสันป่าตอง

จังหวัด เชียงใหม่

รหัสไปรษณีย์ 50120

เบอร์โทรศัพท์ : 097 183 9099

Email Address : tata080129@gmail.com

Facebook : Kritsadaphon Phuttawong

ประวัติผู้ทำโครงการ

ชื่อ-สกุล นายก้องภพ จันทร์อ้าย

รหัสนักศึกษา 6515125005

วัน เดือน ปี เกิด 3 มิถุนายน 2545

ประวัติการศึกษา



ระดับการศึกษา	สถาบันการศึกษา	ปีการศึกษา ที่สำเร็จการศึกษา
ประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง	วิทยาลัยเกษตรและเทคโนโลยีเชียงใหม่	2564
ประกาศนียบัตรวิชาชีพ	วิทยาลัยเกษตรและเทคโนโลยีเชียงใหม่	2562
มัธยมศึกษาตอนต้น	โรงเรียนกู่คำ	2559
ประถมศึกษา	โรงเรียนกู่คำ	2556

สถานที่ที่ติดต่อได้สะดวก

บ้านเลขที่ 97 หมู่ 4

ตำบล หุ้งต้อม อำเภอ สันป่าตอง

จังหวัด เชียงใหม่

รหัสไปรษณีย์ 50120

เบอร์โทรศัพท์ : 063 151 64345

Email Address : kongphob@gmail.com

Facebook : Kongphob Chanai

ประวัติผู้ทำโครงการ

ชื่อ-สกุล นางสาวนิรารวรรณ ศรีรงค์

รหัสนักศึกษา 6515125034

วัน เดือน ปี เกิด 12 สิงหาคม 2544

ประวัติการศึกษา



ระดับการศึกษา	สถาบันการศึกษา	ปีการศึกษา ที่สำเร็จการศึกษา
ประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง	วิทยาลัยเกษตรและเทคโนโลยี มหาสารคาม	2564
มัธยมศึกษาตอนปลาย	โรงเรียนดงเย็นวิทยาคม	2562
มัธยมศึกษาตอนต้น	โรงเรียนดงเย็นวิทยาคม	2559
ประถมศึกษา	โรงเรียนบ้านโคกขามเลียน	2556

สถานที่ที่ติดต่อได้สะดวก

บ้านเลขที่ 22/1 หมู่ 13 บ้านภูทอง

ตำบล ดงเย็น อำเภอกม เมือง

จังหวัด มุกดาหาร

รหัสไปรษณีย์ 49000

เบอร์โทรศัพท์ : 095 920 9176

Email Address : chamook4909@gmail.com

Facebook : sri mook

ประวัติผู้ทำโครงการ

ชื่อ-สกุล นางสาววัชรพร เส่ชู

รหัสนักศึกษา 6515125051

วัน เดือน ปี เกิด 29 ตุลาคม 2544

ประวัติการศึกษา



ระดับการศึกษา	สถาบันการศึกษา	ปีการศึกษา ที่สำเร็จการศึกษา
ประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง	วิทยาลัยเกษตรและเทคโนโลยีเชียงใหม่	2564
ประกาศนียบัตรวิชาชีพ	โรงเรียนราชประชานุเคราะห์ 22	2562
มัธยมศึกษาตอนต้น	โรงเรียนบ้านเมืองแปง	2559
ประถมศึกษา	โรงเรียนบ้านห้วยหมื่นศรีสวัสดิ์	2556

สถานที่ที่ติดต่อได้สะดวก

บ้านเลขที่ 34 หมู่ 8

ตำบล เมืองแปง อำเภอ ปาย

จังหวัด แม่ฮ่องสอน

รหัสไปรษณีย์ 58130

เบอร์โทรศัพท์ : 092 909 3359

Email Address : aemue2133@gmail.com

Facebook : ลูก หมี่